

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA KONSTRUKCÍ

Analýza únosnosti lepených spojů dřevěných konstrukcí
Analysis of carrying capacity of timber structures glued joints

Student:

Bc. Aneta Soběhartová

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Kristýna Vavrušová, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Aneta Soběhartová**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: **Analýza únosnosti lepených spojů dřevěných konstrukcí**
Analysis of carrying capacity of timber structures glued joints

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Teoretický rozbor problematiky lepených spojů dřevěných konstrukcí.
- 2) Experimentální laboratorní ověření únosnosti vybraných modifikací lepených spojů dřevěných konstrukcí.
- 3) Vyhodnocení experimentálního laboratorního měření.
- 4) Stanovení únosnosti testovaných spojů.
- 5) Shrnutí získaných poznatků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) ČSN EN 1995-1-1: Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla – Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- 2) ČSN 73 1702: Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí - Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- 3) ČSN EN 1990: Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí.
- 4) ČSN EN 301: Fenolická a aminová lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Klasifikace a technické požadavky.
- 5) ČSN EN 302-1: Lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání.
- 6) ČSN EN 14358: Dřevěné konstrukce - Výpočet 5% kvantilů charakteristických hodnot a kritéria přijatelnosti pro výběr.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Kristýna Vavrušová, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 01.12.2017



doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Bibliografická citace

SOBĚHARTOVÁ, Aneta Bc. *Analýza únosnosti lepených spojů dřevěných konstrukcí*. Ostrava, 2017. 88 s. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Kristýna Vavrušová, Ph.D..

Anotace

Diplomová práce se zabývá testováním spojů namáhaných na prostý ohyb. Cílem je zjistit chování spoje a porovnat s výpočtem podle platných norem a numerickým modelem. Pro testování je použitý nosník z rostlého dřeva a nastavení nosníku pomocí přílozek z rostlého dřeva a z vrstveného dřeva LVL. Jsou testovány tři typy připojení a to: lepený spoj, spoj s vruty a spoj s použitím kombinace lepidla i vrutů. Spoje jsou testovány čtyřbodovým ohybem.

Závěr této práce je věnován shrnutí, vyhodnocení získaných výsledků a stanovení únosnosti jednotlivých typů testovaných spojů. Součástí práce je i výkresová a fotografická dokumentace spojů.

Klíčová slova

Rostlé dřevo, vrstvené dřevo LVL, spoj, lepidlo, vruty, testování

Anotation

The diploma thesis deals with the testing of joints stressed on plain bending. The aim is to determine the behavior of the joint and to compare it with the calculation according to valid standards and numerical model. For testing, a beam of solid wood is used and the beam is adjusted by means of a solid wood panel and LVL laminate. Three types of connection are tested: glued joint, joint with screws and joint using a combination of glue and screws. The joints are tested by a four-point bend.

The conclusion of this work is devoted to summarizing, evaluating the obtained results and determining the bearing capacity of the individual types of tested joints. Part of the thesis is drawing and photographic documentation of joints.

Key words

Solid wood, laminated wood LVL, joint, glue, screws, testing

Obsah

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ	- 9 -
1 ÚVOD	- 11 -
2 DŘEVO	- 12 -
2.1 DŘEVO JAKO STAVEBNÍ MATERIÁL	- 12 -
2.2 STAVBA DŘEVA	- 13 -
2.2.1 Makroskopická stavba dřeva	- 13 -
2.2.2 Mikroskopická stavba dřeva	- 17 -
2.3 CHEMICKÁ STAVBA DŘEVA	- 18 -
2.4 VLASTNOSTI DŘEVA	- 19 -
2.4.1 Fyzikální vlastnosti	- 20 -
2.4.2 Mechanické vlastnosti	- 21 -
2.5 VRSTVENÉ DŘEVO – LVL	- 22 -
2.5.1 Výroba	- 22 -
2.5.2 Použití	- 23 -
2.5.3 Vlastnosti materiálu	- 23 -
2.6 SPOJE DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ	- 24 -
2.6.1 Lepené spoje	- 25 -
3 SANACE DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ	- 27 -
3.1 ZPEVNŮVÁNÍ DŘEVĚNÝCH PRVKŮ	- 27 -
3.1.1 Příložkování	- 28 -
3.1.2 Výškové nadstavení	- 28 -
3.1.3 Aplikace uhlíkových vláken	- 29 -
3.1.4 Protézování	- 29 -
3.1.5 Ukotvení do ocelové konzoly	- 29 -
3.1.6 Plombování	- 30 -
4 POPIS MĚŘENÍ A TEORIE VÝPOČTŮ	- 31 -
4.1 POPIS MĚŘÍCÍCH PŘÍSTROJŮ	- 31 -
4.2 POPIS TESTOVÁNÍ	- 33 -
4.3 POPIS VZORKŮ A PŘIPOJENÍ	- 33 -
4.4 TEORIE K VÝPOČTU	- 36 -
4.4.1 Výpočet únosnosti lepeného spoje	- 36 -
4.4.2 Výpočet únosnosti spoje s vruty	- 38 -
4.4.3 Výpočet rozmístění vrutů	- 40 -
4.5 TEORIE K MODELOVÁNÍ	- 42 -
5 VÝSLEDKY	- 43 -
5.1 LABORATORNÍ TESTOVÁNÍ	- 43 -
5.1.1 Přilepené příložky z vrstveného dřeva LVL	- 43 -
5.1.2 Přilepené příložky z rostlého dřeva	- 46 -
5.1.3 Příložky z vrstveného LVL dřeva připojené vruty	- 49 -
5.1.4 Příložky z rostlého dřeva připojené vruty	- 52 -
5.1.5 Přilepené příložky z vrstveného dřeva LVL i s vruty	- 55 -
5.1.6 Přilepené příložky z rostlého dřeva i s vruty	- 58 -
5.2 VÝSLEDKY VÝPOČTŮ	- 61 -
5.2.1 Přilepené příložky	- 61 -
5.2.2 Příložky připojené vruty	- 62 -
5.3 VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ	- 68 -

5.3.1	Přilepené příložky.....	- 68 -
5.4	SROVNÁNÍ.....	- 71 -
5.4.1	Přilepené příložky.....	- 71 -
5.4.2	Příložky připojené vruty.....	- 73 -
5.4.3	Celkové srovnání.....	- 75 -
6	ZÁVĚR.....	- 78 -
	PODĚKOVÁNÍ.....	- 80 -
	POUŽITÁ LITERATURA.....	- 81 -
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	- 84 -
	SEZNAM TABULEK.....	- 86 -
	SEZNAM GRAFŮ.....	- 87 -
	SEZNAM PŘÍLOH.....	- 88 -

Seznam použitého značení

Písmena velké latinské abecedy:

A	plocha průřezu [m ²]
A_{tc}	aktivní lepená plocha [m ²]
$F_{ax,Rk}$	charakteristická únosnost spojovacího prostředku na vytažení [kN]
F_d	maximální zatížení na vrutový spoj [kN]
F_{tc}	návrhová smyková síla [kN]
$F_{v,Rd}$	návrhová únosnost jednoho spojovacího prostředku [kN]
$F_{v,Rk}$	charakteristická únosnost jednoho spojovacího prostředku [kN]
M_b	moment přenesený lepeným spojem [kNm]
M_d	moment ve spoji [kNm]
$M_{y,Rk}$	charakteristický plastický moment únosnosti spojovacího prostředku [N/mm]
N_{Ed}	návrhová normálová síla [kN]
R_{bc}	maximální zatížení na lepený spoj
R_{cc}	rameno vnitřních sil ve spoji [m]

Písmena malé latinské abecedy:

a_1	rozteč rovnoběžně s vlákny mezi spojovacími prostředky v jedné řadě [mm]
a_2	rozteč kolmo k vláknům mezi řadami spojovacích prostředků [mm]
$a_{3,c}$	vzdálenost mezi spojovacím prostředkem a nezatíženým koncem [mm]
$a_{4,t}$	vzdálenost mezi spojovacím prostředkem a zatíženým okrajem [mm]
b	šířka průřezu (příložky) [m]
h	výška průřezu (příložky) [m]
d	průměr kruhového průřezu [mm]
$f_{ax,Rk}$	charakteristická pevnost na vytažení spoje [MPa]
$f_{h,k}$	charakteristická pevnost v otláčení [MPa]
$f_{k2(k3),k}$	charakteristická pevnost lepeného povrchu [MPa]
$f_{u,k}$	charakteristická pevnost vrutů [MPa]
$f_{v,k}$	charakteristická pevnost ve smyku [MPa]
k_{mod}	modifikační součinitel zohledňující vliv trvání zatížení a vlhkosti [-]

l	délka [m]
m_x	aritmetický průměr [-]
r	rameno sil – vzdálenost vrutů [m]
s_x	směrodatná odchylka [-]
t_1	tloušťka příložky [m]
t_2	hloubka vniku hrotu [m]
v_x	variační součinitel [-]

Písmena řecké abecedy:

β	poměr mezi pevnostmi v otláčení prvku [-]
γ_M	součinitel materiálu [-]
π	Ludolfovo číslo [-]
ρ	hustota vzduchu [kg/m ³]
ρ_k	charakteristická hustota dřeva [kg/m ³]

1 Úvod

Dřevo je jeden z nejstarších materiálů, který je využíván ve stavebnictví. Růst využití dřeva ve stavebnictví přináší nové trendy do oblasti inovativních materiálů na bázi dřeva, ale také ke spojování prvků dřevěných konstrukcí. Ve stavebnictví se hodně používá pro své výhodné konstrukční vlastnosti, jako pevnost, nízká hmotnost a dobré izolační vlastnosti. Další velkou výhodou dřeva je, že patří mezi obnovitelné zdroje.

Tuhost a nosnost lepených spojů závisí na několika aspektech (druh dřeva, vlhkost, tloušťka lepené plochy, kvalita procesu lepení atd.). Lepené spoje se ve stavebnictví převážně používají při rekonstrukcích dřevěných konstrukčních prvků – jejich výměnu či případně zpevnění části prvku.

V rámci diplomové práce je zpracováno laboratorní testování s cílem zjistit chování spoje a porovnat s výpočtem dle platných norem [1] a [2] a numerickým modelem.

2 Dřevo

Dřevo patří k nejstarším a nejoblíbenějším přírodním materiálům s nejvšestrannějším využitím. Postupné prohlubování poznatků o struktuře dřeva, chemickém složení, fyzikálních a mechanických vlastnostech vyvolává intenzivní rozvoj techniky a technologie jeho zpracování a mnohostrannosti jeho využívání. Dřevo je pro svůj přírodní charakter, přirozenou kresbu a příznivé fyzikální vlastnosti, estetický vzhled, žádaným prvkem životního prostředí člověka. Dřevo představuje přírodní materiál rostlinného původu, který při odborném hospodaření v lesích může být neustále obnovován, a to v předpokládaném množství a kvalitě. Rostliny, u kterých převážná část pletiv, především v nadzemních osách (kmeny, větve) a kořenech je lignifikovaná se nazývají dřeviny [9].

2.1 Dřevo jako stavební materiál

Dřevo je jedním z nejstarších materiálů, které se lidstvo naučilo využívat ke stavbě obydlí, výrobě pracovních nástrojů i jako zdroje energie. Zatímco většina v současnosti užívaných stavebních materiálů je vyráběna z neobnovitelných zdrojů a jejich výroba je energeticky vysoce náročná, dřevo roste a spotřebovává oxid uhličitý, čímž přispívá ke zpomalování nárůstu jeho obsahu v ovzduší. Dřevo z dobře obhospodařovaných lesů patří k obnovitelným surovinám a jeho používání je šetrné k životnímu prostředí. Využití dřeva pro stavební účely je známo už od počátků architektury a společně s vývojem lidstva se toto využití zdokonalovalo - od prvních primitivních obydlí (zástěny, chýše) přes srubové, nákolní a hrázděné stavby až do současné moderní architektury.

Dřevo jako konstrukční materiál je v řadě ohledů porovnatelné s ocelí. Oba materiály jsou dostupné v podobných tvarech a také spoje dřevěných a ocelových prvků jsou podobné. Dřevěné konstrukční prvky jsou vhodné zejména pro přenos tahových, tlakových a ohybových namáhání. Působí-li však napětí v tahu kolmo k vláknům, je riziko rozštěpení dřeva [13].

Dřevo má řadu předností:

- je obnovitelným zdrojem,
- na rozdíl od ostatních zdrojů je nevyčerpatelné,
- je ekologicky odbouratelné,
- má nízké energetické nároky na zpracování,
- dobře opracovatelné,

- ve srovnání se svou hmotností vykazuje vysokou pevnost a tuhost,
- má malou objemovou hmotnost,
- je vysoce estetický materiál s velkou přirozenou variabilitou barev.

Dřevo má ale i své nedostatky:

- podléhá živočišným, biologickým škůdcům a atmosférickým vlivům,
- je hořlavé,
- mění svůj tvar s vlhkostí,
- má značné nároky na údržbu a ošetřování.

Všechny zmíněné nedostatky je však možno správnými opatřeními snížit na únosnou mez. Pro možnost výroby dřevěných konstrukcí s dlouhou životností, je potřebné pochopit jeho podstatu.

2.2 Stavba dřeva

Dřevo se tvoří činností mízového pletiva (kambia) dřevnatých rostlin a je výsledným produktem asimilačního procesu, je tedy v podstatě přeměněnou sluneční energií. Není to hmota homogenní, nýbrž je složena z buněk, které tvoří soubory, kterým říkáme pletiva. Máme tři druhy pletiv, na povrchu pletivo pokožkové, uvnitř kmene pletivo svazků cévních, jež je uloženo v základním pletivu. Pravidelně je v kmeni vyvinut ještě čtvrtý typ, pletivo dělivé (kambium) [20].

Rozeznáváme stavbu dřeva:

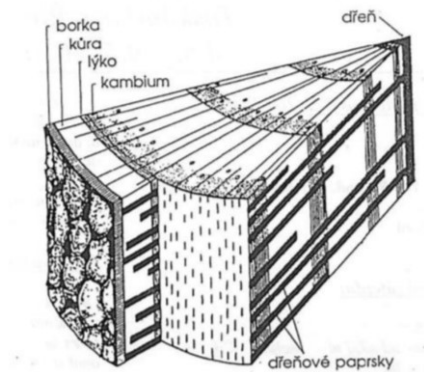
- makroskopickou
- mikroskopickou

2.2.1 Makroskopická stavba dřeva

Makroskopickou strukturou dřeva (obr. 1) se rozumí soubor znaků tvořících kresbu (texturu) na povrchu dřeva, která je charakteristická pro určité dřeviny, což umožňuje určení příslušného druhu dřeva. Většinu znaků lze pozorovat pouhým okem nebo lupou. Nejdůležitějšími makroskopickými znaky jsou [20]:

- a) letokruhy,
- b) dřeň, dřevné paprsky, dřevné skvrny,

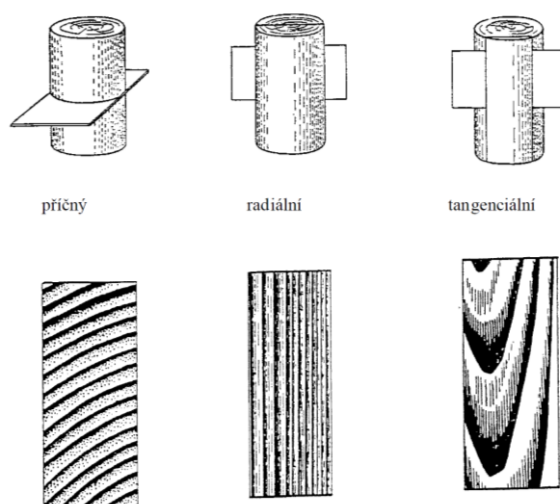
- c) jádro, vyztužené dřevo, běl,
- d) pryskyřičné kanálky,
- e) cévy,
- f) kambium, lýko, kůra.



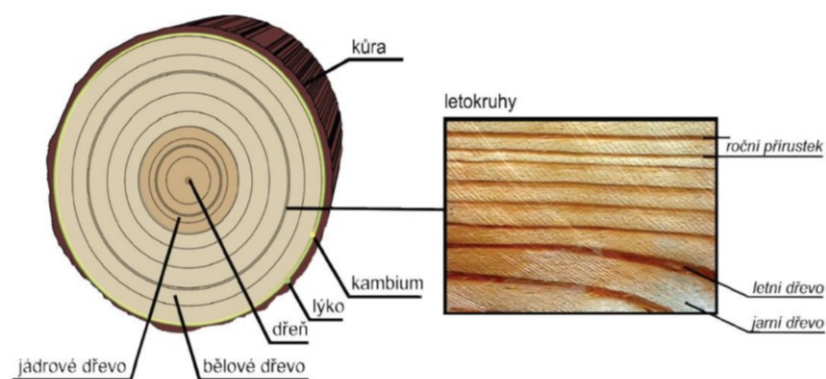
Obr. 1 - Makroskopická stavba kmene [18]

Jejich uspořádání a umístění v kmenu posuzujeme na těchto základních řezech kmenem (obr. 2):

- příčný (transverzální) - je veden kolmo na osu kmene,
- podélný středem (radiální) - je veden v rovině rovnoběžné s osou kmene a prochází jeho středem,
- podélný tečnový (tangenciální) - je veden v rovině rovnoběžné k ose kmene, ale středem neprochází.



Obr. 2 - Základní řezy dřevem: příčný, radiální a tangenciální [20]



Obr. 3 - Prvky kmene na příčném řezu [18]

Letokruhy:

Letokruhem se rozumí tloušťkový (radiální) přírůst dřeva vytvořený ve vegetačním období příslušného roku periodickou činností dělivých buněk kambia. U našich dřevin jsou letokruhy dobře rozlišitelné, protože se skládají ze dvou rozdílných vrstev - jarního a letního dřeva. Jarní dřevo je tvořeno z buněk velkých a tenkostěnných bohatých na vodu, proto je světlé a řídké. Letní dřevo je tvořeno z buněk menších, užších, více sploštělých, tlustostěnných, proto je hustší, tvrdší a tmavší barvy [20].

Dřeň, dřeňové paprsky, dřeňové skvrny:

Je podstatně měkčí než okolní dřevo má většinou odlišnou barvu, na příčném řezu se nachází uprostřed letokruhů. Nachází se uprostřed kmene. Většinou je více či méně posunuta mimo geometrický střed kmene (v ideálním případě se nachází v jeho geometrickém středu). Má tvar kruhový nebo oválný, ve výjimečných případech čtyřúhelníkový, pětiúhelníkový nebo hvězdicovitý. Její průměr je asi 2 - 5 mm.

Paprsky lze pozorovat na příčném i podélném řezu. Na příčném řezu to jsou lesklé čáry, které vybíhají z dřene ke kůře. U některých dřevin (dub, buk, jilm) jsou viditelné pouhým okem. U některých dřevin je můžeme pozorovat lupou (jasan, topol, habr, lípa, všechny jehličnany).

Skvrny jsou pozorovatelné pouze na tečnových řezech, mají hnědou nebo nazelenalou barvu, svým tvarem připomínají dřevné paprsky, vznikají poškozením kambia hmyzem nebo bakteriemi (bříza, olše, vrba, topol, javor, jilm), někdy jsou považovány za vadu dřeva [20].

Jádro, vyztřalé dřevo, běl:

Jádro - jsou to vnitřní partie kmene (mezi dření a bělovým dřevem) části jehličnatých i části listnatých dřevin, ve kterých již neprobíhá transport vody a zásobních látek "mrtvé, vyztřalé dřevo". Jádro je odlišně zbarvené (tmavší) a ostře ohraničené. Je obvykle trvanlivější a odolnější proti napadení škůdci. Typickými dřevinami tvořícími jádrové dřevo jsou: borovice, modřín, akát, dub, jasan, jilm.

Vyztřalé dřevo - jsou rovněž vnitřní partie ostatních jehličnatých i některých listnatých dřevin, které netvoří jádro, ve kterých již neprobíhá transport vody a zásobních látek. Vyztřalé dřevo není odlišně zbarvené a není trvanlivější, ani odolnější proti napadení škůdci než bělové dřevo. Typickými dřevinami tvořícími vyztřalé dřevo jsou: smrk, jedle, douglaska aj.

Běl - jsou to venkovní partie kmene (mezi jádrem a kambiem) jehličnatých i části listnatých dřevin (některé listnaté dřeviny jsou celobělové – neobsahují jádro např. buk, bříza, javor, habr, olše aj.), ve kterých ještě probíhá transport vody a zásobních látek "živé dřevo". Bělové dřevo je propustné pro kapaliny, málo trvanlivé a snadno podléhá hnilobě i jiným škůdcům [20].

Prvskyřičné kanálky:

Jsou charakteristické pro jehličnatá dřeva (smrk, borovice, modřín). Jsou to tenké kanálky, které jsou naplněny prvskyřicí. Tyto kanálky mohou mít směr rovnoběžný s osou kmene (svislé prvskyřičné kanálky) nebo procházejí dřevovými paprsky. Na příčném řezu jsou vidět jako lesklé nebo tmavé tečky, na podélných řezech jako hnědé čárky [20].

Cévy:

Lze je pozorovat na příčném řezu u listnatých dřevin. Jsou to patrné drobné otvory – řezy cév. Podle uspořádání cév rozdělujeme listnaté dřeviny na kruhovitě pórovité a roztroušeně pórovité. Kruhovitě pórovité dřeviny mají cévy soustředěny do jarních přírůstků v letokruzích a vytvářejí tak prstence (dub, jasan, jilm). Roztroušeně pórovité dřeviny mají cévy rozdělené v letokruhu rovnoměrně (javor, lípa, topol, buk, habr) [20].

Kambium, lýko, kůra:

Kambium je dělivé pletivo, na jedné straně přirůstá dřevo a na druhé přirůstá lýko. Dřevní buňky se oddělují cca 10 x rychleji než buňky lýkové.

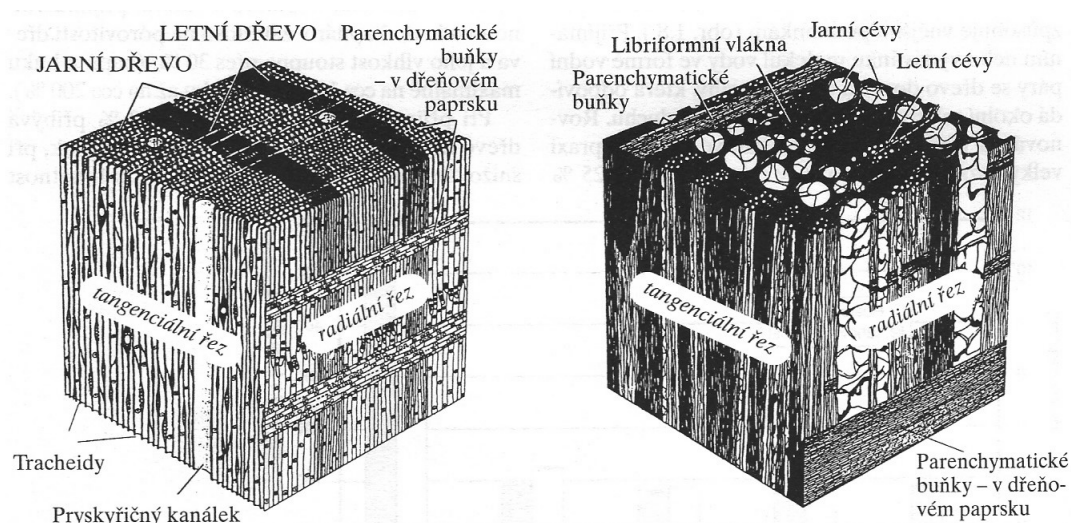
Lýko se nachází mezi kůrou a kambiem, na jaře odvádí zásobní látky z kořenů a zásobních míst ve dřevě do pupenů a rašících listů. Během vegetačního období rozvádí látky vzniklé fotosyntézou v listech do celého kmene stromu.

Kůra je ochranné pletivo, tvoří plášť kmene, větví a kořenů. Mezi ostatní makroskopické znaky patří: nepravé jádro, barva, textura dřeva, očka, svalovitost, kořenice, lískovcové dřevo, suky, reakční dřevo, vůně, lesk, objemová hustota, tvrdost. O nich ale až v části vady dřeva a vlastnosti dřeva [20].

2.2.2 Mikroskopická stavba dřeva

Mikroskopickou stavbu dřeva (obr. 4) lze pozorovat pomocí dobré lupy nebo pod mikroskopem. Dřevo je složeno z buněk, které lze rozdělit do tří typů:

- a) libriformní vlákna
- b) tracheje a tracheidy
- c) parenchymatické buňky



Obr. 4 - Stavba jehličnatého a listnatého dřeva [20]

Libriformní vlákna:

Nacházejí se hlavně u listnatých dřevin. Jsou to odumřelé buňky, které vyztužují dřevo, dodávají mu svým tvarem pevnost [20].

Tracheje a tracheidy:

Tracheje nacházíme pouze u listnáčů. Jsou to buňky, které slouží k rozvádění vody s rozpuštěnými živinami. U jehličnanů nacházíme tracheidy, které mají stejnou funkci jako tracheje u listnáčů [20].

Parenchymatické buňky:

Nacházejí se hlavně v dřevných paprscích, jsou živé a obsahují cytoplazmu, rezervní látky a různé produkty výměny [20].

2.3 Chemická stavba dřeva

Dřevo je velmi složitý komplex různých látek, z nichž základ tvoří přírodní polymery. Základními chemickými prvky ve dřevě jsou uhlík C, kyslík O, vodík H a dusík N. Jejich zastoupení se liší dle druhu dřeviny. Průměrné hodnoty jsou C = 49,5%, O = 44%, H = 6 % a N = 0,3%. Ostatní látky, zastoupeny ve dřevní hmotě necelým jedním procentem jsou: draslík, sodík, vápník, fosfor, hořčík a jiné [19], [23].

Základní chemické sloučeniny obsaženy ve dřevě:

Celulóza:

Svým chemickým složením je polysacharid. Je hlavním komponentem dřeva, který tvoří kostru buněčných stěn. Obsah celulózy v jehličnatých dřevinách je 45-50%, v listnatých dřevinách pak 40-45% [14], [23].

Hemicelulóza:

Stejně jako celulóza je hemicelulóza polysacharid. Je nejslabším prvkem ve dřevě z hlediska toho, že je rychle ničena UV zářením a houbami. Ve dřevě je obsažena v množství od 15-25% u jehličnanů a 25-45% u listnatých stromů [14], [23].

Lignin:

Je po celulóze druhou nejčastější organickou sloučeninou na Zemi. Jeho hlavním úkolem je spojování celulózových buněk, vláken a cév, čímž vytváří strukturu dřeva, ale také dalších rostlin, jako je sláma, konopí, len atd. Dřevu dodává pevnost, především pevnost v tlaku. Je termoplastický a vyznačuje se absorpcí světla. V jehličnanech představuje 25-30% objemu, v listnácích pak 20-25% [14], [23].

Akcesorické (doprovodné) složky:

Tyto látky najdeme uvnitř buněk i v mezibuněčných prostorech. Jsou různé chemické povahy. Mají vliv na barvu a vůni dřeva, ale také na fyzikální a mechanické vlastnosti. Mohou být jak organické, tak i anorganické. Organické látky jsou u našich dřevin zastoupeny 1-3 %, u tropických dřevin až 15%. Anorganické látky jsou u stromů našeho podnebí zastoupeny asi 0,1-0,5%, u tropických dřevin až 5%. Anorganické látky tvoří po spálení popel [14], [23].

- organické - sacharidy (škrob, pektiny)
 - terpenoidy (terpentýn, kalafuna, kaučuk),
 - látky fenolického typu (trísloviny, flavonoidy, chinony, lignany)
 - dále alkaloidy, kyseliny, alkoholy, bílkoviny, tuky, vosky
- anorganické - vápenaté, draselné a hořečnaté soli

Voda:

Poslední, avšak důležitou základní chemickou sloučeninou je voda [14], [23].

2.4 Vlastnosti dřeva

Pro různé dřeviny se mohou fyzikální a mechanické vlastnosti výrazně lišit. Toto tvrzení se zejména uplatní pro prvotní výběr dřeva na stavební konstrukci, kdy můžeme na základě praktických zkušeností odhadnout, zda vybrané dřevo vyhoví našim požadavkům.

Dřevo je nehomogenní materiál, což se projevuje na všech jeho úrovních - submikroskopické, mikroskopické (stavba buňky) i makroskopické (dřeň, jádro, běl, ...). Dalšími nehomogenitami jsou růstové vady, kterými mohou být například suky. Vlastnosti dřeva jsou závislé jak na orientaci, tak i na směru, což znamená, že je anizotropní. To se nejvíce projevuje při rozměrových změnách spojených s příjmem a výdejem vody, dále pak také v pevnosti dřeva. Dřevo je velmi pórovité, jeho póry vytvářejí průchodný kapilární systém, který je možné zaplnit vodou. U některých dřevin je tato průchodnost snížena obsahem doprovodných látek, ale tyto mají zase za následek jejich obtížnější impregnovatelnost. Současně je materiálem hydrofobickým, má tedy schopnost vázat na sebe vodu z okolního prostředí, která má za následek rozměrové změny [14].

2.4.1 Fyzikální vlastnosti

Mezi fyzikální vlastnosti dřeva patří ty vlastnosti, které lze zkoumat bez narušení chemického složení a celistvosti materiálu. Mezi tyto vlastnosti řadíme následující:

- barvu a kresbu dřeva,
- lesk a vůni dřeva,
- vlhkost dřeva,
- hustotu dřeva,
- tepelné, akustické a elektrické vlastnosti.

Vlhkost dřeva:

Z hlediska použitelnosti dřeva je vlhkost jeho rozhodující vlastností. Vlhkost dřeva je dána množstvím vody obsaženým ve dřevě (poměr hmotnosti vody a dřevní sušiny). V dřevní hmotě se nachází 3 typy vod: voda volná, voda vázaná a voda chemicky vázaná.

Vlhkost dřeva udává množství vody ve dřevě vyjádřené v procentech. V praxi se rozlišuje tzv. relativní vlhkost a absolutní vlhkost dřeva [14], [24].

Hustota:

Dřevo listnatých stromů má obvykle větší hustotu, než dřevo jehličnatých dřevin. Určuje se přibližným odhadem na základě hmotnosti vzorku. Podle tohoto odhadu můžeme rozlišovat tři druhy dřevin [14], [24]:

- s nízkou hustotou (do 540 kg/m^3) - např.: borovice, smrk, jedle
- se střední hustotou ($540\text{-}750 \text{ kg/m}^3$) - např.: modřín, bříza, buk
- s vysokou hustotou (těžké) - (nad 750 kg/m^3) - např.: habr, akát

Můžeme však nalézt výjimky, a to dřeviny s extrémně nízkou hustotou - balza (130 kg/m^3) a s extrémně vysokou hustotou - guajak (1360 kg/m^3).

Tepelné vlastnosti:

Základní vlastností dřeva popisující jeho tepelné vlastnosti je měrná tepelná kapacita, která udává množství tepla procházející jednotkou plochy a tloušťky materiálu za jednotku času při jednotkovém tepelném spádu. Dřevo má hodnotu měrného tepla $c = 1,357 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, z čehož vyplývá, že dřevo pohlcuje teplo velmi dobře a je proto dobrý tepelný izolátor. Tepelná vodivost

dřeva je velmi malá, protože má dřevo malou objemovou hmotnost a je pórovité, a proto je vhodným tepelně izolačním materiálem [14], [24].

Akustické vlastnosti:

Závisí na rychlosti šíření zvuku vyjádřenou v m.s^{-1} . Rychlost šíření závisí na anatomické stavbě dřeviny a na směru šíření. V podélném směru se zvuk šíří rychleji než ve směru kolmém na vlákna. Zvuková vodivost dřeva se dá srovnat s kovy a pohybuje se v rozmezí 4 000 – 5 000 m.s^{-1} a ve směru na vlákna kolmém v rozmezí 1 000 – 1 300 m.s^{-1} [14], [24].

Elektrické vlastnosti:

Dřevo patří mezi materiály, které podle obsahu vlhkosti mohou být buď izolanty, nebo i částečně elektricky vodivé. Se zvyšováním vlhkosti a teploty se elektrický odpor snižuje. Měrný elektrický odpor dřeva je ve směru vláken dvakrát menší než ve směru kolmém na vlákna.

2.4.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dřeva jsou dány jeho schopností odporovat působení vnějších mechanických sil. Mezi tyto vlastnosti patří:

- pružnost
- pevnost
- tvrdost
- houževnatost dřeva

Pružnost:

Je vratná deformace dřeva působením vnějších sil, dřevo se ale po jejich působení vrací do původního tvaru. Modul pružnosti se udává v MPa, vyjadřuje napětí, při němž se v mezích pružnosti mění pevnostní parametry dřeva. Modul pružnosti se mění v závislosti na druhu dřeviny, na vlhkosti, na anizotropii, na vadách dřeva a na objemové hmotnosti [14], [24].

Pevnost:

Je nevratná deformace nebo celkové porušení dřeva působením vnějších sil. Základní pevnostní charakteristiky dřeva jsou: pevnost v tlaku (rovnoběžně a kolmo na vlákna) pevnost v tahu (rovnoběžně a kolmo na vlákna), pevnost v ohybu a pevnost ve smyku [14], [24].

Tvrдост:

Tvrдостí dřeva rozumíme velikost jeho odporu proti vnikání cizího tělesa. Tvrдост dřeva ovlivňuje: směr vláken, vlhkost dřeva, objemová hmotnost, anatomická stavba [14].

Houževnatost:

Rázová houževnatost je schopnost dřeva absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem.

2.5 Vrstvené dřevo – LVL

Vrstvené dřevo (laminated veneer lumber) (obr. 6) je materiál na bázi dřeva u něhož většina nebo i všechny dýhy jsou slepeny vzájemně rovnoběžně. Idea vrstveného dřeva vznikla v 60-tých letech a výroba byla rozšířena v 80-tých letech [11].

2.5.1 Výroba

Kmeny jsou odkorněny a skladují se 24 hodin v horké vodě. Poté jsou rozděleny na loupané dýhy, které jsou opět pokrájeny na dýhové listy (obr. 5) dlouhé asi 2 m. Dýhy mají tloušťku 3 až 4 mm a třídí se podle jejich hustoty. Po sušení je na dýhy nanášeno fenolformaldehydové lepidlo a dýhy jsou ukládány na sebe s vzájemně rovnoběžnými vlákny, takže vytvářejí nekonečný pás požadované tloušťky. V podélném směru jsou dýhy vzájemně spojeny na úkos s výjimkou středních dýh, nastavovaných natupo. Tyto styky jsou vzájemně vystřídány, aby se minimalizoval jejich vliv na pevnost vrstveného dřeva. Svazek na sebe navrstvených dýh je lisován při teplotě asi 150 °C. Po lisování jsou desky vrstveného dřeva řezány na požadované rozměry. Mohou se vyrábět v délce větší než 20 m. Výroba se kontroluje pravidelnou kontrolou jakosti lepených spojů a pevnosti v ohybu [11].



Obr. 5 - Způsoby získávání dýh [18]

2.5.2 Použití

Vrstvené dřevo se může používat jako nosníky, desky, pruty příhradových konstrukcí a skořepin. Uplatňuje se jak v novostavbách, tak i při přestavbách na nosníky, vaznice, pásy příhradových konstrukcí, podlahy dopravních vozidel, lešeňové desky a v konstrukcích montovaných domů [11].

2.5.3 Vlastnosti materiálu

Trvanlivost vrstveného dřeva je porovnatelná s trvanlivostí přírodního dřeva. Pro zlepšení trvanlivosti ve vlhkém prostředí může být impregnováno.

Obsah vlhkosti po výrobě je asi 10% a v provozním stavu je zpravidla o 2% nižší než obsah vlhkosti rostlého dřeva [11].

Výhody vrstveného dřeva:

- mnohostranné použití,
- dostupnost ve velkých tloušťkách a mnoha formátech,
- velmi vysoká pevnost,
- vynikající rozměrová stabilita,
- dobrá pevnost proti vytažení vrutů,
- nízká hmotnost,
- minimalizace sedání konstrukcí.



Obr. 6 - Vrstvené LVL dřevo [11]

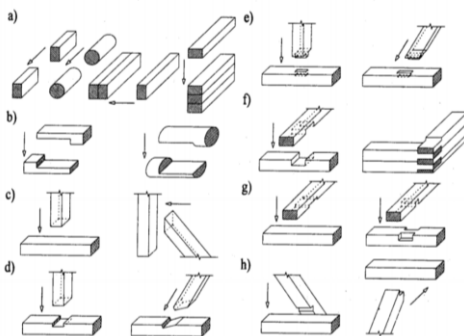
2.6 Spoje dřevěných konstrukcí

V současné době existuje nepřeberné množství spojovacích prostředků. Spojovací prostředky slouží ke spojení konstrukčních prvků, čímž zajišťují jejich větší spolupůsobení a stabilitu.

Spoje dřevěných konstrukcí hrají významnou úlohu ve spolehlivosti (tj. únosnosti, tuhosti i životnosti) těchto konstrukcí. Z tohoto důvodu je spojům dřevěných konstrukcí na celém světě věnována mimořádná pozornost [19].

Spoje dle druhu spojovacího prostředku dělíme na:

a) tesařské spoje (obr. 7)



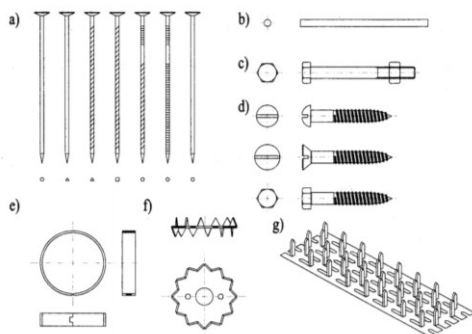
Obr. 7 - Základní tesařské spoje [19]

b) spojovací prostředky kolíkového typu (obr. 8)

- hřebíkové a sponkové spoje
- svorníkové a kolíkové spoje
- vrutové spoje

c) spojovací prostředky povrchového typu (obr. 8)

- hmoždíky
- desky s prolisovanými trny



Obr. 8 - Spojovací prostředky kolíkového a povrchového typu [19]

d) lepené spoje

Spoje dle tuhosti:

- nepoddajné spoje – lepené spoje,
- poddajné – tesařské spoje a spoje s mechanickými spojovacími prostředky.

Spoje kolíkového typu z ocelových spojovacích prostředků vykazují odlišnou odezvu na zatížení než lepené spoje. Lepené spoje jsou sice výrazně tužší, ale na druhé straně se vyznačují malou duktilitou. Spoje kolíkového typu s ocelovými spojovacími prostředky se výrazněji deformují [19].

2.6.1 Lepené spoje

Existence lepených spojů sahá daleko do historie lidstva, ačkoliv by se na první pohled mohlo zdát, že se jedná o technologii moderní. Lepený spoj je vytvářen pomocí speciálních lepidel, vyvinutých pro tyto účely. Samotné lepidlo je nekovový materiál, který spojuje dvě pevné části bez zásahu do jejich struktury a bez jakéhokoliv použití jiných spojovacích prostředků. Pevnost spoje je zajištěna v důsledku přilnavosti lepidla k povrchu a jeho dobré vnitřní soudržnosti.

Lepení je proces spojování materiálů (adherendů), při kterém se dosahuje trvalé spojení stejných, případně různých materiálů prostřednictvím lepidel (adhesiv). Lepidlo je látka schopná utvořit pevné a trvalé spojení mezi dvěma materiály. Uvedená schopnost závisí od adheze k povrchům lepených materiálů a od koheze samotného lepidla [15].

Na základě teorie lepení můžeme určit tyto základní podmínky lepení:

- správná volba lepeného materiálu a lepidla,
- správný návrh konstrukce spoje,
- vhodná povrchová úprava materiálů,
- dodržování předepsaného postupu při lepení,
- vytvoření fyzikálněchemických a jiných podmínek vzniku pevných vazeb.

Při volbě materiálů na lepení se přihlíží na jejich chemickou povahu (chemické složení), polaritu, mechanické, povrchové, fyzikální a fyzikálněchemické vlastnosti [15].

V případě lepidel jsou to:

- chemická povaha,
- viskozita lepidla,
- povrchově napětí,
- bod vzplanutí,
- způsob vytvrzování,
- tepelná roztažnost,
- mechanické vlastnosti.

Rozdělení lepidel podle principu tuhnutí ve spoji:

a) Lepidla tuhnoucí vsáknutím a odpařením rozpouštědel ve spoji:

- rozpouštědlová lepidla disperzní,
- rozpouštědlová lepidla roztoková,
- tavná lepidla,
- lepidla stále lepivá.

b) Lepidla reaktivní:

- lepidla tuhnoucí vlivem vlhkosti,
- lepidla tuhnoucí kontaktem s kovy bez přístupu vzduchu,
- lepidla tuhnoucí po přidání tvrdidel,
- lepidla tuhnoucí zvýšenou teplotou,
- lepidla tuhnoucí UV zářením nebo světlem.

Rozdělení lepidel podle chemické báze:

a) Lepidla na přírodní bázi:

- lepidla anorganického a minerálního původu (vodní sklo, asfaltová, silikátová, metalická, keramická lepidla aj.),
- lepidla organického původu (glutinová, kaseinová, albuminová, škrobová, dextrinová lepidla aj.).

b) Lepidla na syntetické bázi:

- (epoxidová, polyuretanová, akrylátová lepidla a silikony aj.).

3 Sanace dřevěných konstrukcí

Sanace je výměna nebo zpevnění několika částí stavby. Provádí se při nich významné zásahy do nosných systémů stavby, s cílem odstranit střední a větší poruchy.

Sanace dřevěných konstrukčních prvků označují zákrok vynucený dosažením mezních stavů únosnosti a spolehlivosti. Mezi nejčastější vady a poruchy patří nedostatečná kvalita dřeva, chybné provedení konstrukčních detailů, špatná dimenze prvků, poškození biotickými a abiotickými činiteli. Mezi nejvíce sledované poruchy patří - poškození hnilobou, dřevokazným hmyzem, vysokou vlhkostí, ale také nadměrným zatížením vedoucím k nežádoucím velkým deformacím [22].

Odstraňování příčin poruch dřevěných staveb:

- a) Odstranění zdroje zvýšené vlhkosti (hydroizolace, vzduchová izolace, kondenzovaná voda, oprava střešního pláště, atd.)
- b) Zastavení požerkových, plísňových a hnilobných procesů ve dřevě (vysušení dřeva, likvidace biotických škůdců, sterilizace dřeva, atd.)
- c) Odstranění příčin povětrnostní koroze dřeva.
- d) Prevence před poškozením dřeva v budoucnosti (nové konstrukční řešení, dodatečná chemická a protipožární ochrana, atd.)
- e) Odstranění zdroje zvýšeného statického zatížení (doplňkové staticko-konstrukční zásahy-odstranění nefunkčních vrstev, výměna stávajících stavebních hmot za lehčí, lehké příčky, atd.)

3.1 Zpevňování dřevěných prvků

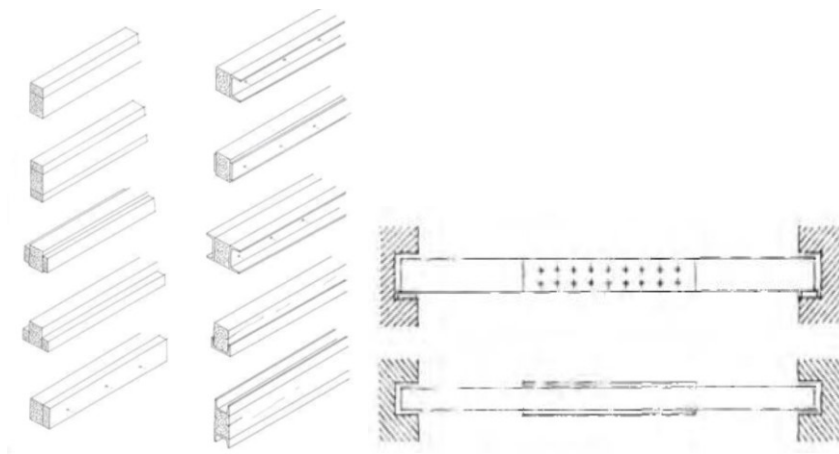
Zpevňování se provádí u prvků poškozených bio a atmosférickou korozí, případně při zvýšení zatížení v důsledku sanace stavby. Způsob zpevňování závisí na typu stavby, prvku a historickém významu stavby [22].

Zpevňování může být:

- Přímé - (příložkování a výškové nastavení, aplikace uhlíkových vláken, protézování, ukotvení do ocelové konzoly, plombování, aj.)
- Nepřímé – (podepření, vyvěšení, ztužení)

3.1.1 Příložkování

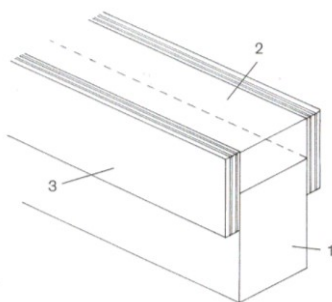
Zpevňování dřevěných konstrukcí příložkováním se používá k zesílení poškozených prvků nebo ke zvýšení nosnosti konstrukce. Je to způsob zpevnění, který se provádí za použití příložky jednostranné nebo oboustranné (obr. 9). Jako materiál příložky se volí dřevěná prkna nebo fošny, ocelové plechy, válcované profily nebo moderními uhlíkové tkaniny připevněné k poškozenému prvku svorníky, hřebíky nebo lepením [22].



Obr. 9 - Způsoby připojení příložek [17]

3.1.2 Výškové nadstavení

Prvky jsou nadstaveny vrstvou dalšího materiálu (obr. 10), který se spojí s materiálem prvku a vznikne tak efekt, jako by se jednalo o jeden prvek, ale většího rozměru. Tato metoda se provádí především u stropních trámů, kde změna výšky jednoho nebo jen několika vůči ostatním může být problematická. Na boky trámu se připevní pásy, tzv. ztracené bednění, do něhož se nalije polymerbeton. Ten se spojí se dřevem prvku, ztuhne. Na bednění se obvykle používají konstrukční desky např. PDP, DTD, OSB, ale za určitých podmínek i masivní dřevo [17].



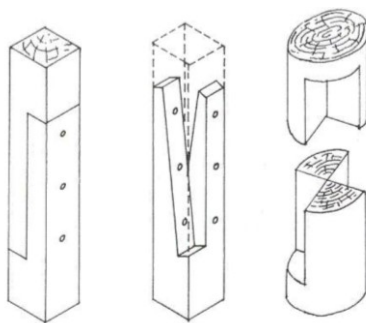
Obr. 10 - Výškové nadstavení [17]

3.1.3 Aplikace uhlíkových vláken

Tato metoda je vhodná především pro stropní konstrukce, a to tehdy není-li viditelná trámová část. Důvodem je, že uhlíkové pásy jsou tenké, ale dávají se křížem, tvoří tedy jakýsi rošt. Pásy se vkládají do drážek a jsou překryty opět pásem dřeva (překližky apod.), což je činí neviditelnými. Umísťují se na tahové straně stropního trámu (tj. zespodu). S materiálem trámu jsou slepeny vhodným lepidlem. Vyztužované prvky musí být při vyztužování mírně předepruty tak, aby po zatížení byly pásy namáhány na tah [22].

3.1.4 Protézování

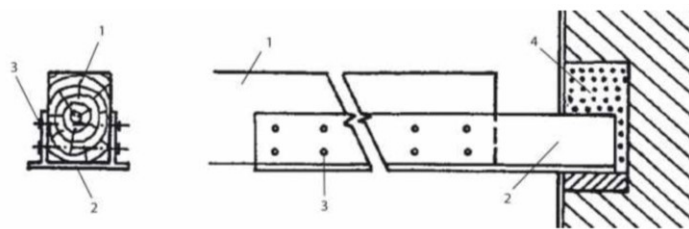
Tato technologie spočívá v nahrazení nebo doplnění poškozené části prvku krovu, takzvanou protézou (obr. 11). Cílem této metody je obnovit původní tuhost a pevnost prvku. Protéza se musí tvarem shodovat s odstraňovanou částí prvku. Z toho vyplývá, že při této metodě se nemění průřez sanovaného prvku, ani typologie původních spojů. Materiál použitý k výrobě protézy by se měl shodovat s protézovaným prvkem (stejný druh dřeva), dají se také použít jiné materiály (jiný druh dřeva, polymerbeton se sklolaminátovými pruty). V praxi našli svoje uplatnění klasické tesařské metody protézování, ale také méně používané metody, jako beta-metoda protézování [16].



Obr. 11 - Způsoby protézování [16]

3.1.5 Ukotvení do ocelové konzoly

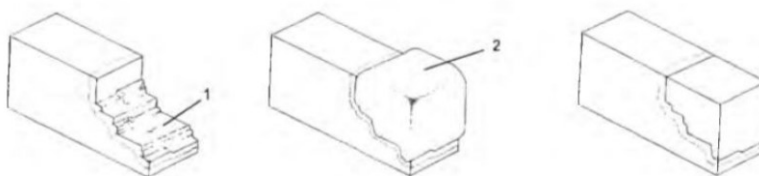
Ocelové konzoly se používají ke zpevnění výrazně poškozených zhlaví stropních nebo vazných trámů (obr. 12). Hniloba nebo jinak poškozené zhlaví trámu se nejprve odstraní, obvykle do vzdálenosti 0,3 až 1 m od čela prvku, který musí být staticky zajištěn (např. podepřením), a zůstatková zdravá část trámu se ukotví do zdi. U ukotvení trámu se jeho zůstatková zdravá část vloží nebo vsune do ocelové konzoly, v níž se pevně zajistí, nejlépe svorníky. Koncový úsek ocelové konzoly musí být ve zdivu pevně fixován [16].



Obr. 12 - Příklad ukotvení do ocelové konzoly [16]

3.1.6 Plombování

Plombování (obr. 13) se provádí zpravidla pro poškození prvku s rozsahem do 30%. Přesně upravená plomba se vloží do předem upraveného místa a očištěného až na zdravé dřevo, kde se soudržnost mezi vložkou a poškozenou konstrukcí zajistí například lepením epoxidovou, či jinou pryskyřicí [22].



Obr. 13 - Plombování [22]

4 Popis měření a teorie výpočtů

Cílem práce bylo zjistit chování vybraných spojů a porovnat výpočet dle platných norem [1], [2] s výsledky získanými na základě destruktivního laboratorního testování a vybrané typy připojení i s numerickým modelem. Pro testování byl sestaven spoj složený ze středového prvku z rostlého dřeva a přílozek z rostlého dřeva nebo vrstveného dřeva LVL. Zkoušené typy spojů byly testovány na prostý ohyb.

4.1 Popis měřících přístrojů

- **Lis EU 100** – pro testování byl použit hydraulický lis.



Obr. 14 - Lis EU100

- **Svinovací metr** – pro měření rozměrů přílozek a trámů.



Obr. 15 - Svinovací metr

- **Váha Soehnle CWE 7745** – byla použita pro vážení příložek.



Obr. 16 – Váha Soehnle CWE 7745

- **Váha Soehnle professional 7755** – byla použita pro vážení trámů.



Obr. 17 – Váha Soehnle professional 7755

- **Digitální posuvné měřítko** – pro měření letokruhů.

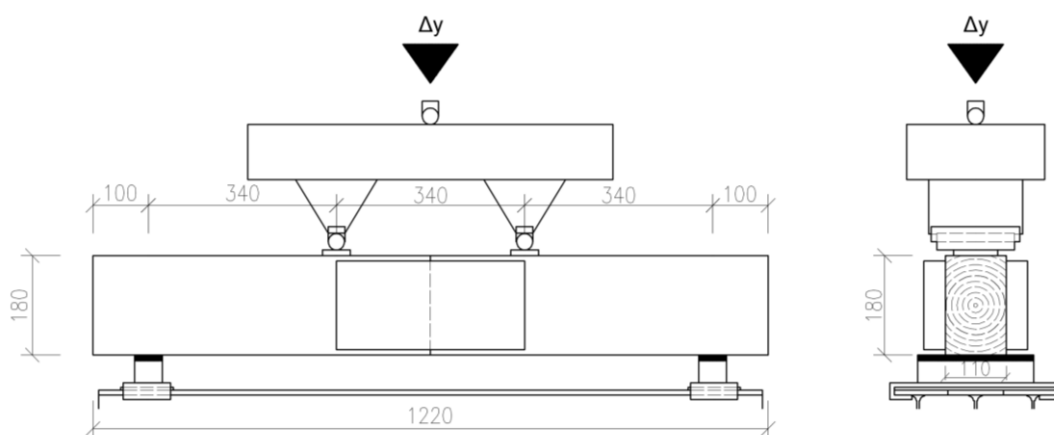


Obr. 18 - Digitální posuvné měřítko

4.2 Popis testování

Laboratorní testování spojů ve čtyřbodovém ohybu (obr. 19) bylo provedeno v lisu EU100 v laboratoři FAST VŠB-TUO. Rychlost zatěžování vzorků byla zvolena tak, aby k porušení došlo v rozmezí 300 ± 120 s, které odpovídá krátkodobé pevnosti dřeva podle platných evropských norem. Během testování byla zaznamenávána síla a odpovídající deformace spoje.

Vzorek byl zatěžován dvěma symetrickými břemeny. Břemena byla umístěna ve třetinách rozpětí což odpovídá délce 0,34 m.



Obr. 19 - Schéma uspořádání laboratorní zkoušky

4.3 Popis vzorků a připojení

Pro laboratorní testování byly sestaveny zkušební vzorky ze středového trámu o rozměrech 110 x 180 x 1220 mm z rostlého dřeva s použitím příložek z vrstveného LVL dřeva o rozměrech 150 x 39 x 340 mm nebo příložek z rostlého dřeva o rozměrech 160 x 50 x 340 mm.

Byly použity tři typy připojení příložek:

- dvousložkové epoxidové lepidlo
- vruty HBS Ø8/80 a HBS Ø8/100
- dvousložkové epoxidové lepidlo s použitím vrutů HBS

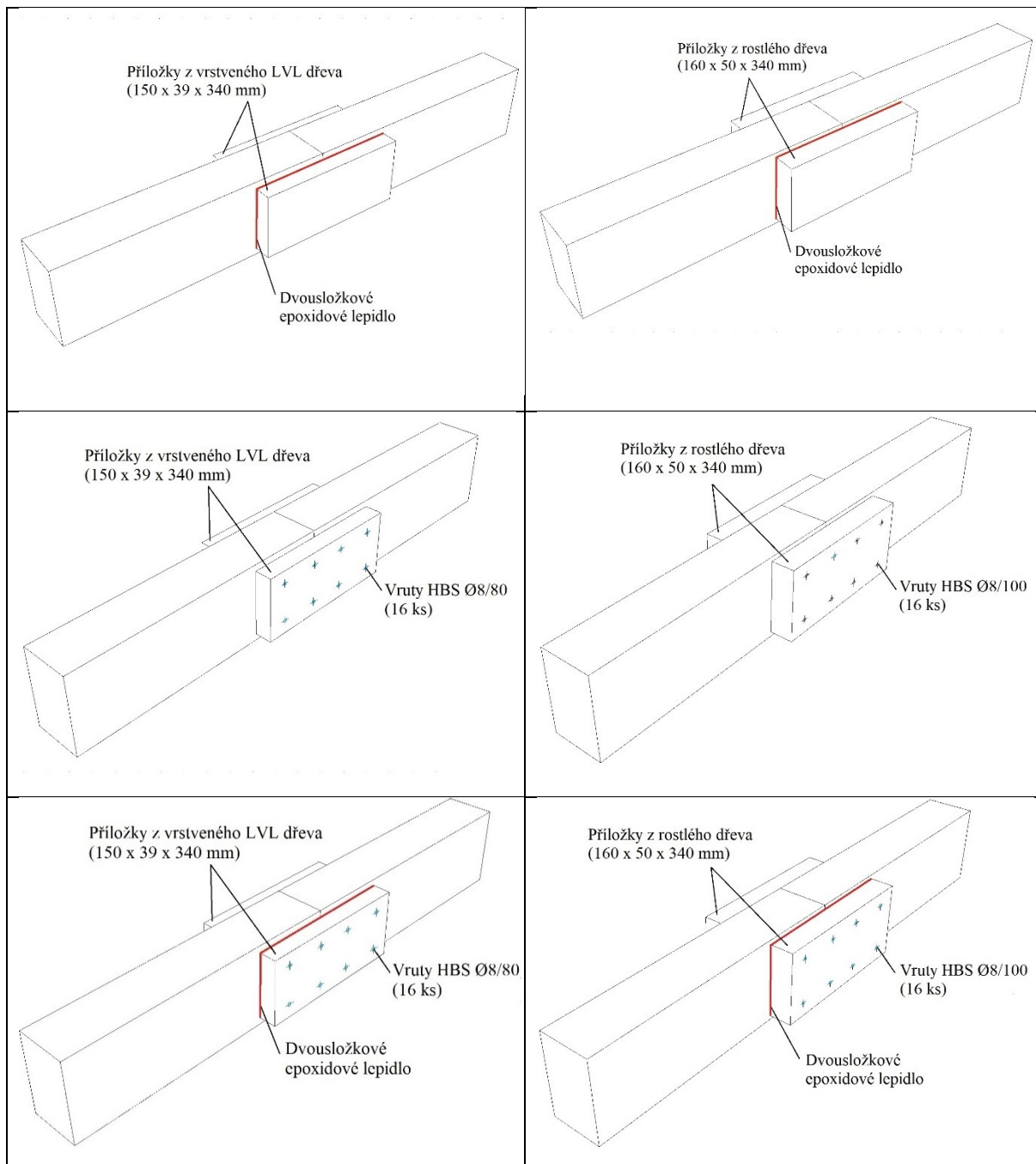


Obr. 20 - Vrutky HBS

Pro laboratorní testování byly použity vruty (obr. 20) HBS Ø8/80 do přílozek z vrstveného LVL dřeva a HBS Ø 8/100 do přílozek z rostlého dřeva.

Jednotlivé kombinace připojení jsou vyobrazeny v tab. 1.

Tab. 1 - 3D modely všech typů spojů



Nejprve byl každý vzorek a k němu příslušné příložky očíslovány (obr. 21), změřeny jednotlivé rozměry trámů a přílozek svinovacím metrem (obr. 22), průměrné šířky deseti sousedních letokruhů posuvným měřítkem (obr. 24) dle kritérii uvedených v [8] a následně veškeré vzorky zváženy (obr. 23).



Obr. 21- Číslování jednotlivých vzorků



Obr. 22 - Měření vzorků



Obr. 23 - Vážení trámů a příložek

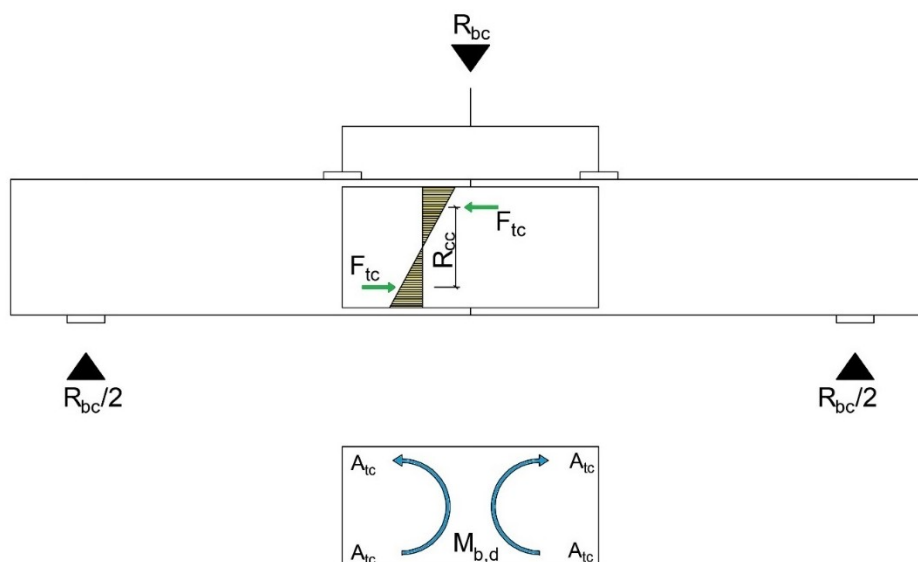


Obr. 24 - Šířky letokruhů na trámech i příložkách z rostlého dřeva

4.4 Teorie k výpočtu

4.4.1 Výpočet únosnosti lepeného spoje

Na obr. 25 je zobrazen model spoje s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva. Je to schéma rozložení napětí a vnitřních sil ve spoji.



Obr. 25 - Schéma vnitřních sil a napětí v lepeném spoji

- k_{mod} modifikační součinitel [-]
- Uvažováno krátkodobé zatížení (0,9)
- γ_M dílčí součinitel vlastnosti materiálu [-]
- Pro spoje dřevěných konstrukcí (1,3)

Výpočet dle normy [2]:

Aktivní lepená plocha příložky:

$$A_{tc} = \frac{\left(h \cdot \frac{b}{2}\right)}{2} [m^2] \quad kde, \quad (1)$$

h – výška příložky [m]

b – šířka příložky [m]

Výpočet únosnosti:

Návrhová síla:

$$F_{tc} = \frac{f_{v,k}(f_{k2,(k3),k}) \cdot k_{mod} \cdot A_{tc}}{2 \cdot \gamma_M} [kN] \quad kde, \quad (2)$$

$f_{v,k}$ - charakteristická pevnost ve smyku [MPa]

$f_{k2,(k3),k}$ - charakteristická pevnost lepeného povrchu [MPa]

Moment přenesený lepeným spojem na oba středové prvky:

$$M_b = F_{tc} \cdot 2 \cdot R_{cc} [kNm] \quad kde, \quad (3)$$

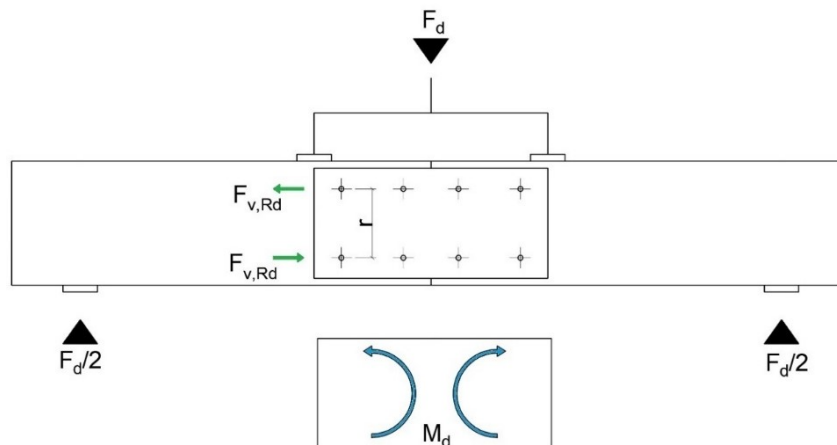
R_{cc} - rameno sil působících ve spoji [m]

Maximální zatížení na spoj:

$$R_{bc} = \frac{2 \cdot M_b}{0,34} [kN] \quad (4)$$

4.4.2 Výpočet únosnosti spoje s vruty

Na obr. 26 je zobrazen model spoje s příložkami z vrstveného LVL dřeva připojené vruty. Je to schéma rozložení vnitřních sil ve spoji.



Obr. 26 - Schéma vnitřních sil ve spoji s vruty

k_{mod}	modifikační součinitel [-]
	- Uvažováno krátkodobé zatížení (0,9)
γ_M	dílčí součinitel vlastnosti materiálu [-]
	- Pro spoje dřevěných konstrukcí (1,3)

Výpočet dle normy [1]:

Charakteristická pevnost v otláčení:

$$f_{h,k,1} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_{k,1} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

$$f_{h,k,2} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_{k,2} \text{ [MPa]} \quad \text{kde,}$$

ρ_{k1} - hustota příložky [kg/m³]

ρ_{k2} - hustota trámů [kg/m³]

d - průměr vrutu [mm]

Poměr mezi pevnostmi v otláčení prvků:

$$\beta = \frac{f_{h,k,2}}{f_{h,k,1}} [-] \quad (6)$$

Charakteristická hodnota plastického momentu únosnosti:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} [Nmm] \quad kde, \quad (7)$$

$f_{u,k}$ - charakteristická pevnost vrutů [MPa]

Charakteristická pevnost na vytažení kolmo k vláknům:

$$f_{ax,k} = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_k^{1,5} [MPa] \quad (8)$$

Charakteristická osová únosnost na vytažení spojovacího prostředku:

$$F_{ax,Rk} = (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} \cdot f_{ax,k} [-] \quad (9)$$

Charakteristická únosnost jednoho stříhu jednoho spojovacího prostředku [1]:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d & (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d & (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & (f) \end{cases}$$

Návrhová únosnost jednoho stříhu jednoho spojovacího prostředku:

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} [kN] \quad (10)$$

Moment přenesený spojem na trámy:

$$M_d = 2 \cdot 2 \cdot F_{v,Rd} \cdot r [kNm] \quad , kde \quad (11)$$

r - rameno sil – vzdálenost vrutů [m]

Maximální zatížení na spoj:

$$F_d = \frac{2 \cdot M_d}{0,34} [kN] \quad (12)$$

Aritmetický průměr

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} \quad (13)$$

Směrodatná odchylka

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n - 1}} \quad (14)$$

Variační koeficient

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} \quad (15)$$

4.4.3 Výpočet rozmístění vrutů

- **Příložky z vrstveného dřeva:**

Rozteče a vzdálenosti okrajů a konců vrutů dle normy [1]:

Rozteč vrutů v jedné řadě rovnoběžně s vlákny:

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = (4 + \cos 90^\circ) \cdot 8 = 32 \text{ mm}$$

Rozteč řad vrutů kolmo k vláknům:

$$a_2 = 4 \cdot d = 4 \cdot 8 = 32 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi vrutem a nezatíženým koncem:

$$a_{3,c} = 4 \cdot d = 4 \cdot 8 = 32 \text{ mm}$$

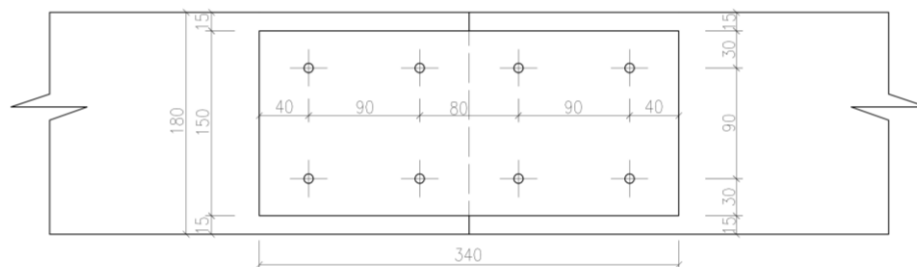
Vzdálenost mezi vrutem a zatíženým okrajem:

$$a_{4,t} = \max \left\{ \begin{matrix} [(2 + \sin \alpha) \cdot d] \\ 3 \cdot d \end{matrix} \right\} = \max \left\{ \begin{matrix} 32 \\ 24 \end{matrix} \right\} = 32 \text{ mm}$$

V tab. 2 jsou vypsány rozteče a vzdálenosti okrajů a konců podle výpočtu z normy, dále rozměry dle výrobce vrutů. V posledním sloupci jsou vypsány rozměry, které byly použity. Pro zvětšení ohybového momentu ve spoji byly upraveny rozteče a vzdálenosti okrajů a konců (obr. 27).

Tab. 2 - Rozmístění vrutů u příložky z vrstveného dřeva

LVL	Min vzdálenosti dle výpočtu	Vzdálenosti dle výrobce vrutů	Použité vzdálenosti
a ₁	32	32	90
a ₂	32	32	90
a _{3,c}	32	56	40
a _{4,t}	32	56	30



Obr. 27 - Rozmístění vrutů u příložky z vrstveného dřeva

- Příložky z rostlého dřeva:**

Rozteče a vzdálenosti okrajů a konců vrutů dle normy [1]:

Rozteč vrutů v jedné řadě rovnoběžně s vlákny:

$$a_1 = (4 + \cos \alpha) \cdot d = (4 + \cos 90^\circ) \cdot 8 = 32 \text{ mm}$$

Rozteč řad hřebíků kolmo k vláknům:

$$a_2 = 4 \cdot d = 4 \cdot 8 = 32 \text{ mm}$$

Vzdálenost mezi hřebíkem a nezatíženým koncem:

$$a_{3,c} = 4 \cdot d = 4 \cdot 8 = 32 \text{ mm}$$

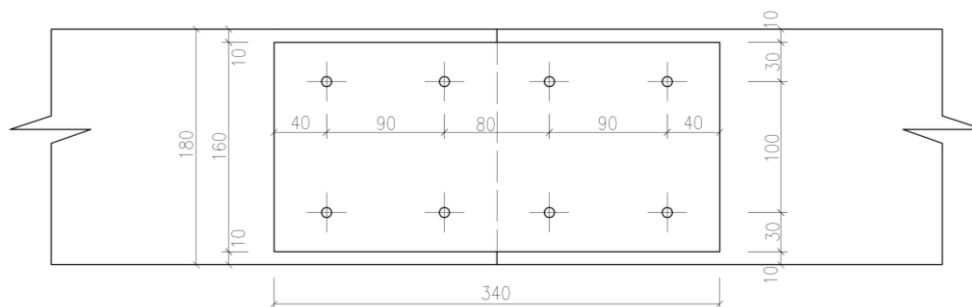
Vzdálenost mezi hřebíkem a zatíženým okrajem:

$$a_{4,t} = \max \left\{ \begin{matrix} [(2 + \sin \alpha) \cdot d] \\ 3 \cdot d \end{matrix} \right\} = \max \left\{ \begin{matrix} 32 \\ 24 \end{matrix} \right\} = 32 \text{ mm}$$

V tab. 3 jsou vypsány rozteče a vzdálenosti okrajů a konců podle výpočtu z normy, dále pak rozměry dle výrobce vrutů. V posledním sloupci jsou vypsány rozměry, které byly použity. Pro zvětšení ohybového momentu ve spoji byly upraveny rozteče a vzdálenosti okrajů a konců (obr. 28).

Tab. 3 - Rozmístění vrutů u příložky z rostlého dřeva

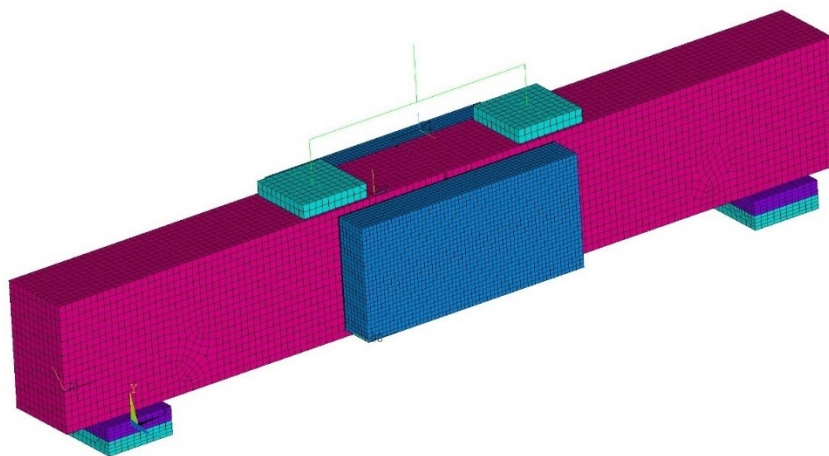
RD	Min vzdálenosti dle výpočtu	Vzdálenosti dle výrobce vrutů	Použité vzdálenosti
a_1	32	32	90
a_2	32	32	100
$a_{3,c}$	32	56	40
$a_{4,t}$	32	56	30



Obr. 28 - Rozmístění vrutů u příložky z rostlého dřeva

4.5 Teorie k modelování

V programu ANSYS byl sestaven objemový model (obr. 29) s užitím konečných prvků SOLID45 a pomocné prutové prvky BEAM189. Objemovými prvky byly modelovány sledované části konstrukce a spoje. Prutovými prvky byla simulována hlava lisu a její roznos na ocelové desky. Numerický model byl vypracován s uvážením konstrukční, geometrické a fyzikální nelinearity. Fyzikální nelinearita byla zohledněna v materiálových modelech jednotlivých částí konstrukce spoje.



Obr. 29 - 3D model

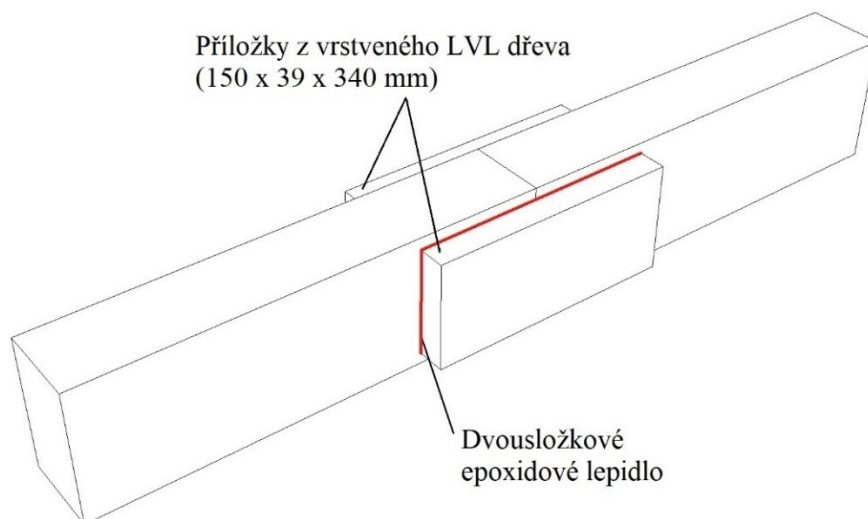
Při porovnávání numerických modelů s hodnotami získanými laboratorně je nutné měřit deformaci pomocí extenzometrů, tak aby byly odseparovány přídatné deformace způsobené reálným uložením skutečných vzorků. Proto se mohou grafy deformačních křivek lišit, jelikož data jsou z naměřených hodnot lisu.

5 Výsledky

5.1 Laboratorní testování

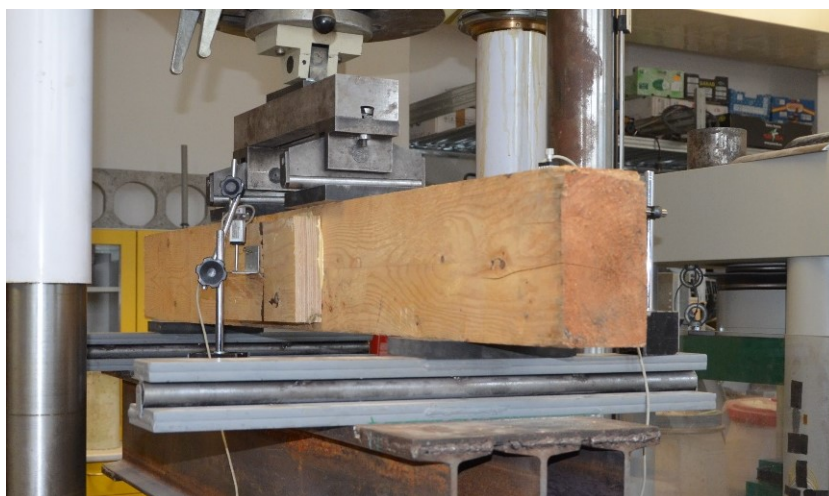
5.1.1 Přilepené příložky z vrstveného dřeva LVL

Na obr. 30 je zobrazen model spoje s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva.



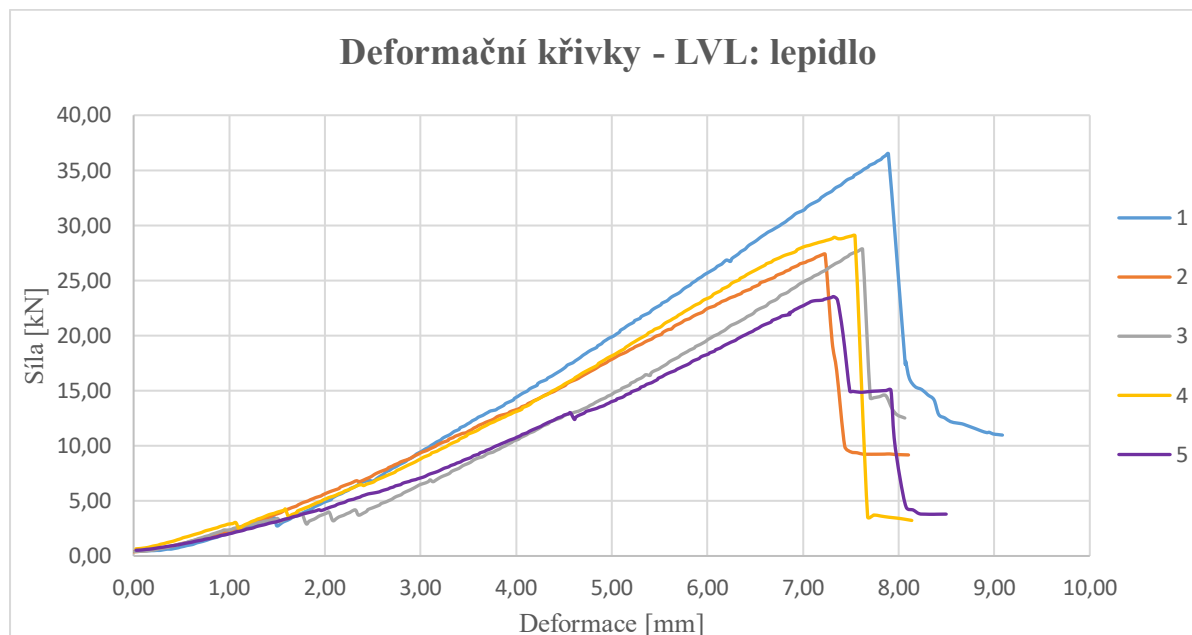
Obr. 30 - 3D model spoje s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva

Spoj byl tvořen základním trámem z rostlého dřeva a dvěma bočními příložkami z vrstveného LVL dřeva (obr. 31) o rozměrech 150 x 340 mm a tloušťce 39 mm, tvořené 13-ti vrstvami dýh. Na spoj bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo.



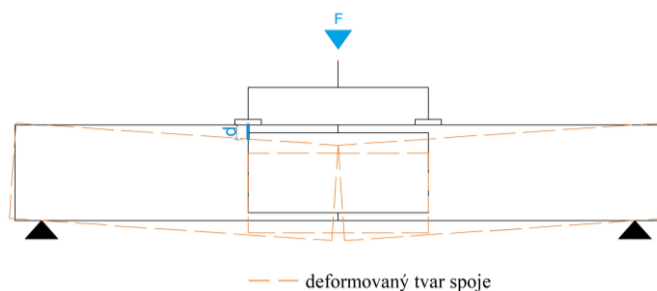
Obr. 31 - Zatěžování spoje

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf č.1 zobrazující deformační křivky, které znázorňují závislost síly na deformaci.



Graf č.1- Deformační křivky - LVL: lepidlo

Z výsledků měření je stanovena průměrná hodnota svislé síly na mezi únosnosti spojů s přilepenou příložkou z vrstveného LVL dřeva 28,86 kN a průměrná hodnota deformace z naměřených hodnot je 8,38 mm.



Obr. 32 - Schéma deformace spoje

Tab. 4 - Naměřené síly a deformace

Vzorek	Max. síla F [kN]	Max. deformace d [mm]
1	36,50	9,09
2	27,37	8,10
3	27,83	8,07
4	29,05	8,14
5	23,53	8,50
Průměrná hodnota	28,86	8,38

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel sil:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 28,86$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 4,24$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,149$$

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel deformací:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 8,38$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 0,39$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,0461$$

Z grafu č. 1 je patrné, že průběh deformačních křivek tohoto typu připojení je lineární. Při dosažení maximální únosnosti tohoto spoje dochází k náhlému kolapsu spoje křehkým porušením.

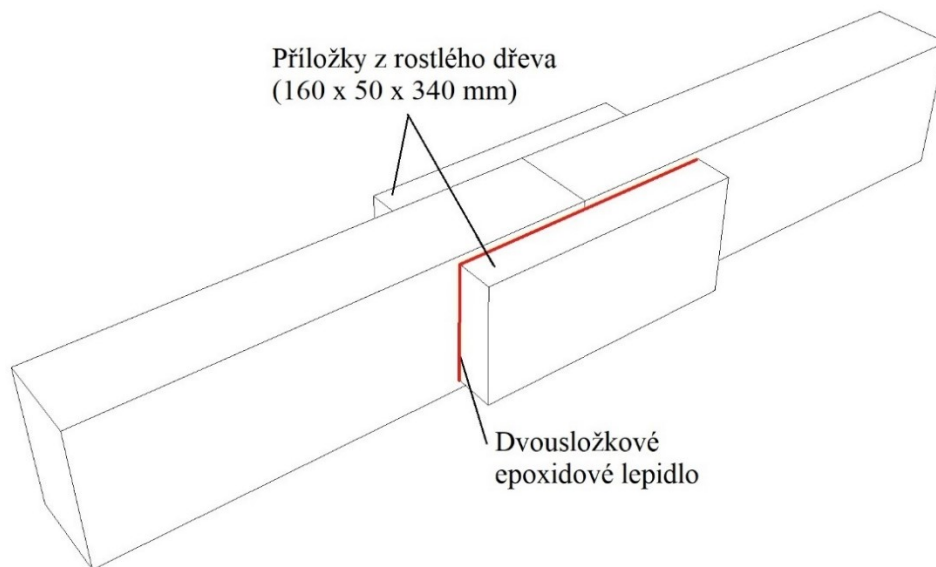


Obr. 33 - Porušený spoj

U těchto lepených příložek z LVL dřeva dochází ke smykovému porušení v první nebo druhé dýze vrstvené LVL příložky (obr. 33).

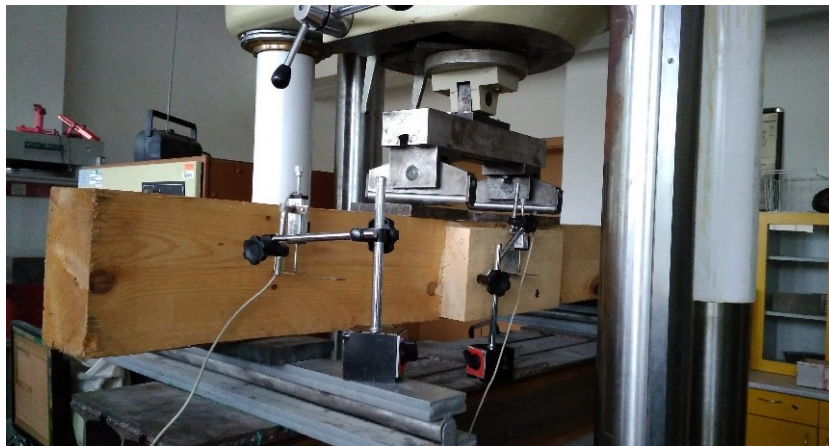
5.1.2 Přilepené příložky z rostlého dřeva

Na obr. 34 je zobrazen model spoje s přilepenými příložkami z rostlého dřeva.



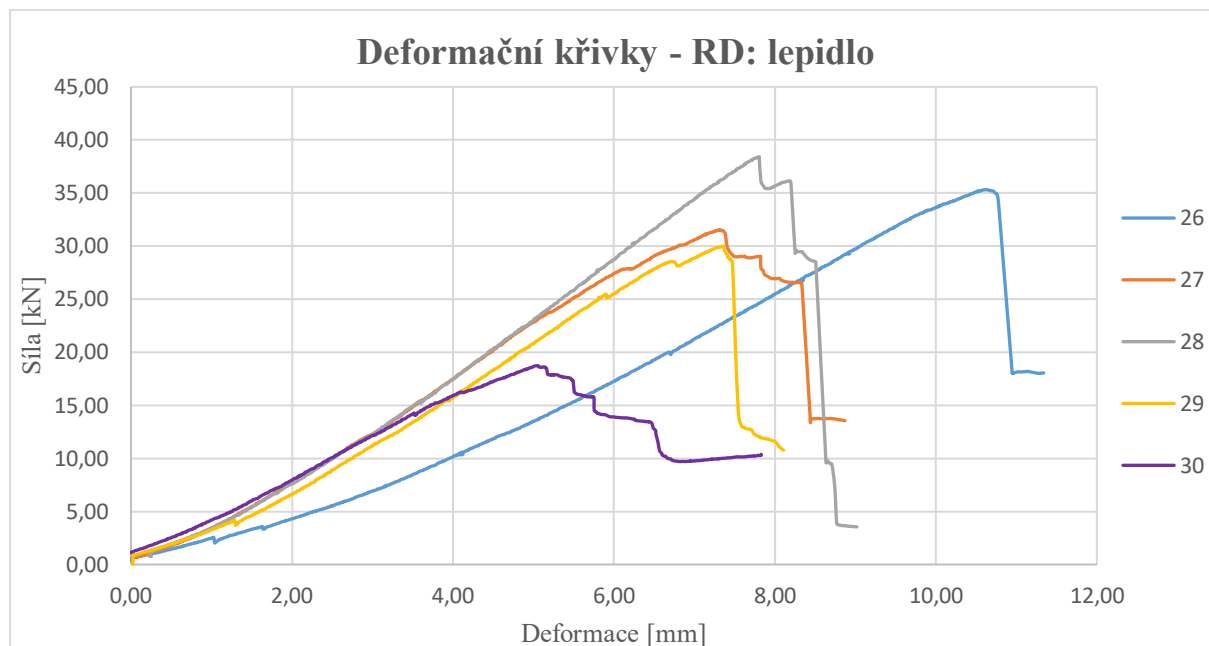
Obr. 34 - 3D model spoje s přilepenými příložkami z rostlého dřeva

Spoj byl tvořen základním trámem z rostlého dřeva a dvěma bočními příložkami z rostlého dřeva (obr. 35) o rozměrech 160 x 340 mm a tloušťce 50 mm. Na spoj bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo.



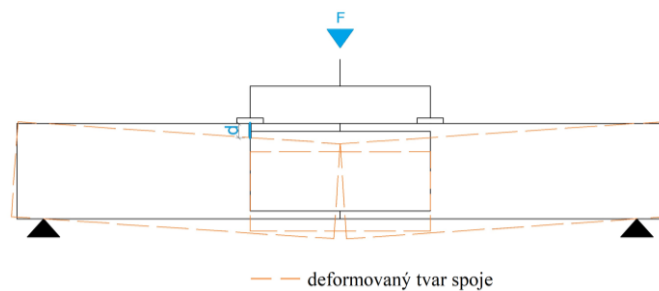
Obr. 35 - Zatěžování spoje

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf č.2 zobrazující deformační křivky, které znázorňují závislost síly na deformaci.



Graf č.2 - Deformační křivky - RD: lepidlo

Průměrná hodnota svislé síly na mezi únosnosti spojů s lepenou příložkou z rostlého dřeva je 30,8 kN a průměrná hodnota deformace z naměřených hodnot je 9,03 mm.



Obr. 36 - Schéma deformace spoje

Tab. 5 - Naměřené síly a deformace

Vzorek	Max. síla F [kN]	Max. deformace d [mm]
26	35,32	11,34
27	31,54	8,87
28	38,41	9,02
29	29,98	8,11
30	18,72	7,83
Průměrná hodnota	30,80	9,03

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel sil:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 30,8$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 6,72$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,224$$

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel deformací:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 9,03$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 1,24$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,138$$

Z grafu č.2 je patrné, že průběh deformačních křivek tohoto typu spoje je lineární. Při dosažení maximální únosnosti tohoto spoje dochází k náhlému kolapsu spoje křehkým porušením.

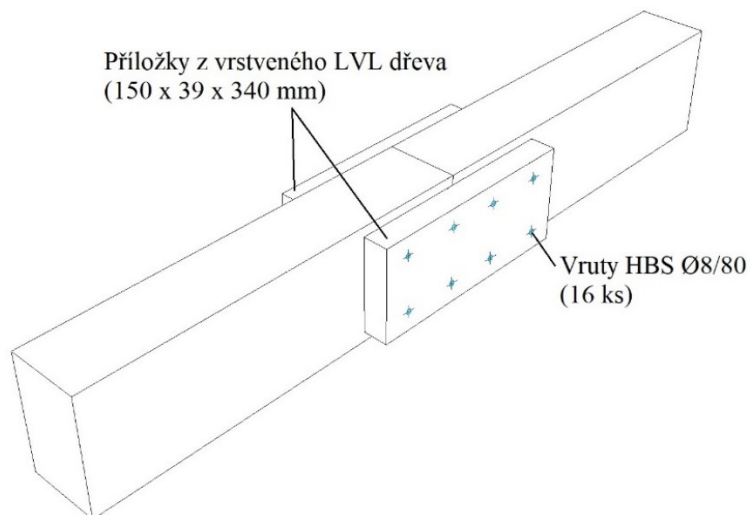


Obr. 37 - Porušení spoje

U těchto příložek z rostlého dřeva docházelo k tomu, že příložky vždy praskly od středového prvku (trámu) směrem ven a vždy směrem nahoru po letokruzích nebo kolmo na letokruhy. Podle zjištěných výsledků z laboratorních testů se spoj porušoval v horní části příložky kombinací tahu kolmo na vlákna a smykem. Dominantní vliv na porušení spoje měl tah kolmo na vlákna (obr. 37).

5.1.3 Příložky z vrstveného LVL dřeva připojené vruty

Na obr. 38 je zobrazen model spoje s příložkami z vrstveného LVL dřeva připojené vruty.



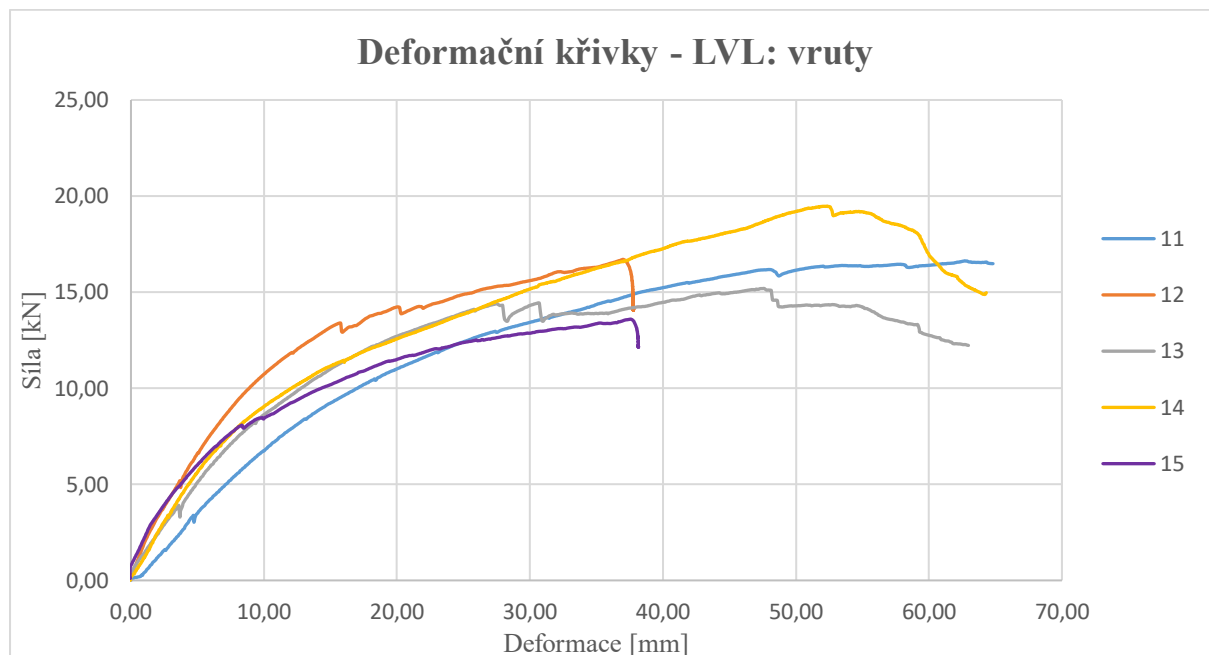
Obr. 38 - 3D model s příložkami z vrstveného LVL dřeva s vruty

Spoj byl tvořen základním trámem z rostlého dřeva a dvěma bočními příložkami z vrstveného LVL dřeva (obr. 39) o rozměrech 150 x 340 mm a tloušťce 39 mm, tvořené 13-ti vrstvami dýh. Na spoj byly použity vruty HBS Ø8/80.



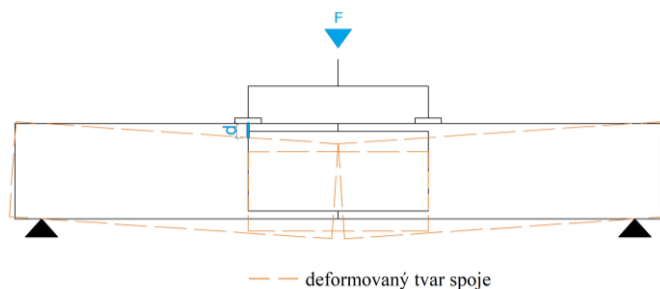
Obr. 39 - Zatěžování spoje

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf č.3 zobrazující deformační křivky, které znázorňují závislost síly na deformaci.



Graf č.3 - Deformační křivky - LVL: vruty

Průměrná hodnota svislé síly na mezi únosnosti spojů s přilepenou příložkou z vrstveného dřeva je 16,32 kN a průměrná hodnota deformace z naměřených hodnot je 53,61mm.



Obr. 40 - Schéma deformace spoje

Tab. 6 - Naměřené síly a deformace

Vzorek	Max. síla F [kN]	Max. deformace d [mm]
11	16,63	64,82
12	16,70	37,79
13	15,19	62,97
14	19,47	64,31
15	13,59	38,17
Průměrná hodnota	16,32	53,61

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel sil:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 16,32$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 1,94$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,12$$

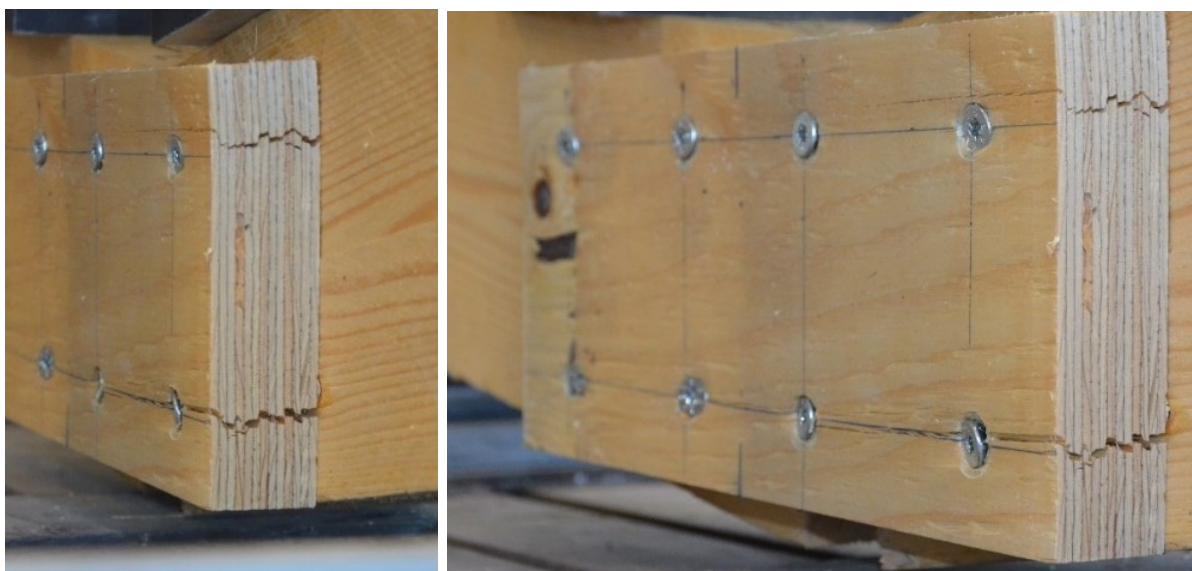
Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel deformací:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 53,61$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 12,78$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,246$$

Z grafu č.3 je patrné, že průběh deformačních křivek tohoto typu spoje je částečně lineární a poté se spoj chová duktilně. Duktilita je typická pro mechanické spojovací prostředky, zvláště pro spojovací prostředky menších průměrů, které se mohou deformovat ohybem. Při dosažení maximální únosnosti tohoto spoje dochází k náhlému kolapsu spoje křehkým porušením, ale v důsledku použití mechanických spojovacích prostředků – vrutů je totální kolaps oddálen. Po dosažení maximální únosnosti mechanického spoje dochází k rozštěpání příločky tahem kolmo na vlákna (křehké chování dřeva).

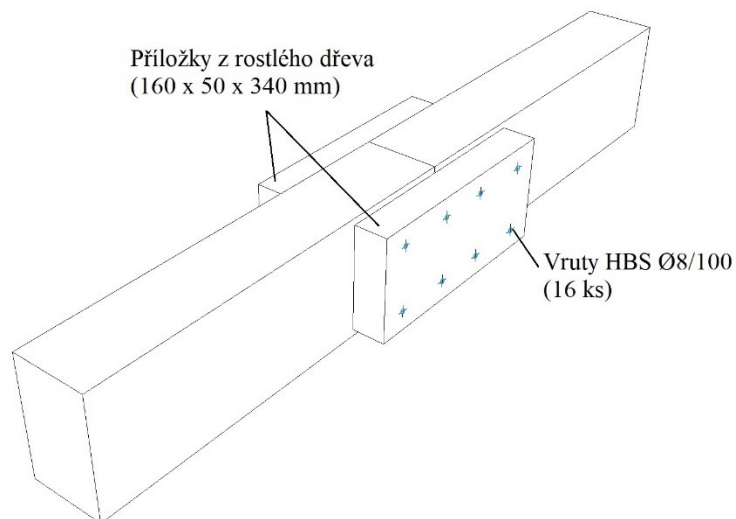


Obr. 41 - Porušení spoje

U těchto vrstvených LVL příložek připojených vruty docházelo k trhlině kolmo na dýhy v úrovni vrutů (obr. 41).

5.1.4 Příložky z rostlého dřeva připojené vruty

Na obr. 42 je zobrazen model spoje s příložkami z rostlého dřeva připojené vruty.



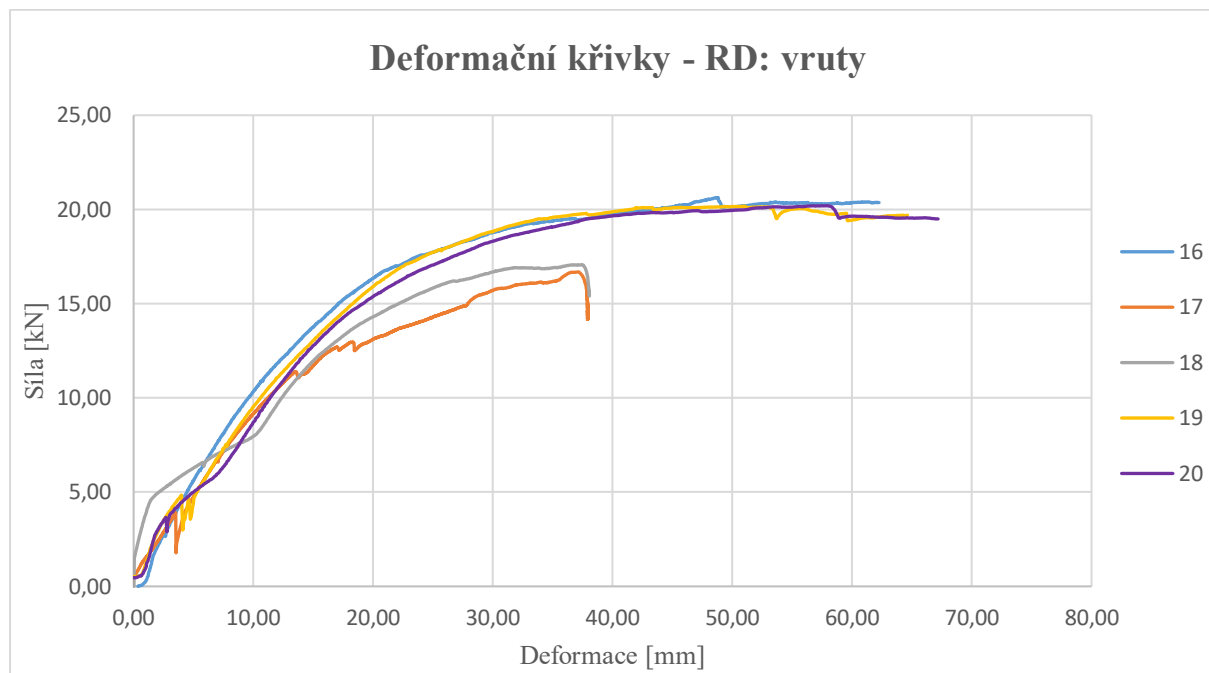
Obr. 42- 3D model s příložkami z rostlého dřeva s vruty

Spoj byl tvořen základním trámem z rostlého dřeva a dvěma bočními příložkami z rostlého dřeva (obr. 43) o rozměrech 160 x 340 mm a tloušťce 50 mm. Na spoj byly použity vruty HBS Ø8/100.



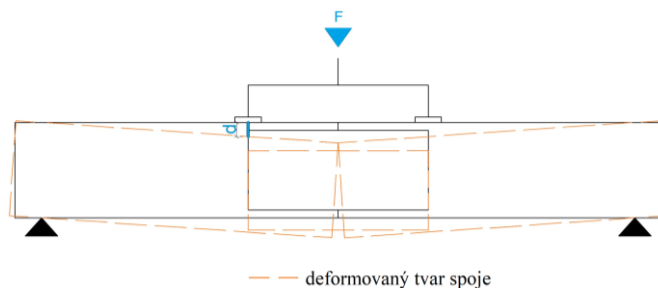
Obr. 43 - Zatěžování spoje

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf č.4 zobrazující deformační křivky, které znázorňují závislost síly na deformaci.



Graf č.4 - Deformační křivky - RD: vruty

Průměrná hodnota svislé síly na mezi únosnosti spojů s lepenou příložkou z rostlého dřeva je 18,98 kN a průměrná hodnota deformace z naměřených hodnot je 54,12 mm.



Obr. 44 - Model deformace spoje

Tab. 7 - Naměřené síly a deformace

Vzorek	Max. síla F [kN]	Max. deformace d [mm]
16	20,63	62,26
17	16,68	37,94
18	17,07	38,07
19	20,18	64,63
20	20,35	67,69
Průměrná hodnota	18,98	54,12

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel sil:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 18,98$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 1,73$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,0914$$

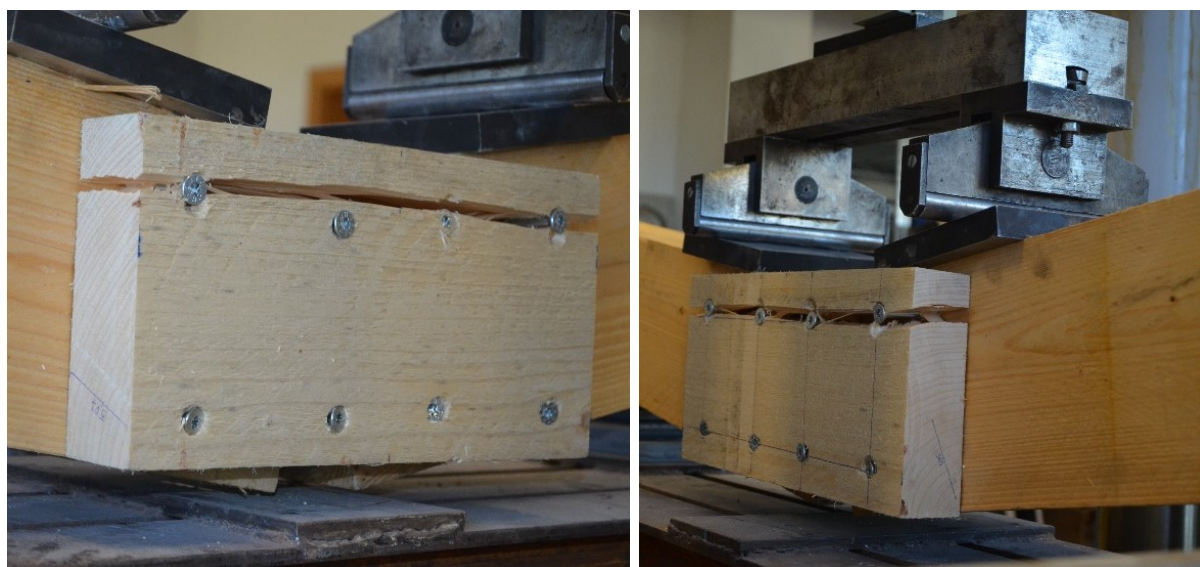
Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel deformací:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 54,12$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 13,27$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,253$$

Z grafu č.4 je patrné, že průběh deformačních křivek tohoto typu spoje je částečně lineární a poté se spoj chová duktilně. Duktilita je typická pro mechanické spojovací prostředky, zvláště pro spojovací prostředky menších průměrů, které se mohou deformovat ohybem. Tento typ porušení je vhodný pro stavební konstrukce, protože před selháním spoje naznačuje prostřednictvím zvýšených deformací blížící se kolaps spoje. Při dosažení maximální únosnosti tohoto lepeného spoje dochází k náhlému kolapsu spoje křehkým porušením, ale v důsledku použití mechanických spojovacích prostředků – vrutů je totální kolaps oddálen. Po dosažení maximální únosnosti mechanického spoje dochází k rozstípaní příložky tahem kolmo na vlákna (křehké chování dřeva).

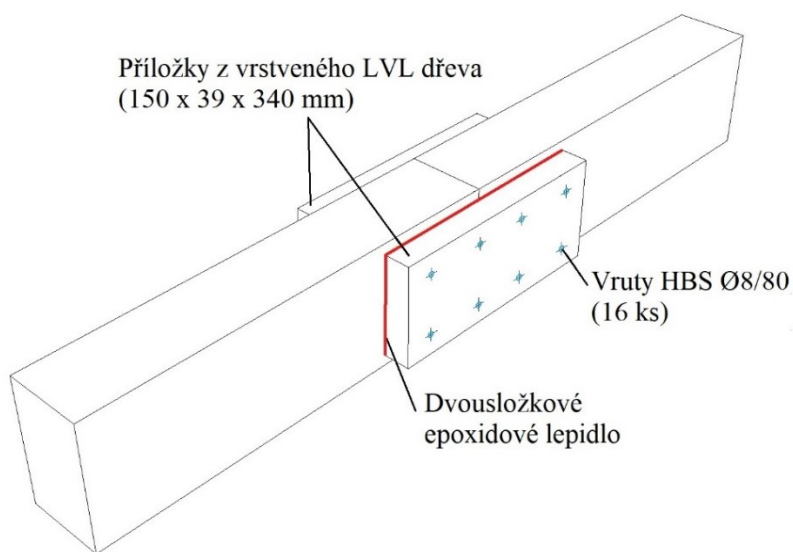


Obr. 45 - Porušení spoje

U těchto příložek z rostlého dřeva připojených vruty docházelo k rozštípnutí horní tlačené části příložky v rovině vrutů (obr. 45). Hraje zde roli nízká pevnost dřeva v tahu kolmo na vlákna a taky to že vruty v horní řadě mají vektor výsledné síly od ohybu, což vede k rozštípnutí příložky.

5.1.5 Přilepené příložky z vrstveného dřeva LVL i s vruty

Na obr. 46 je zobrazen model spoje s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva připojené i vruty.



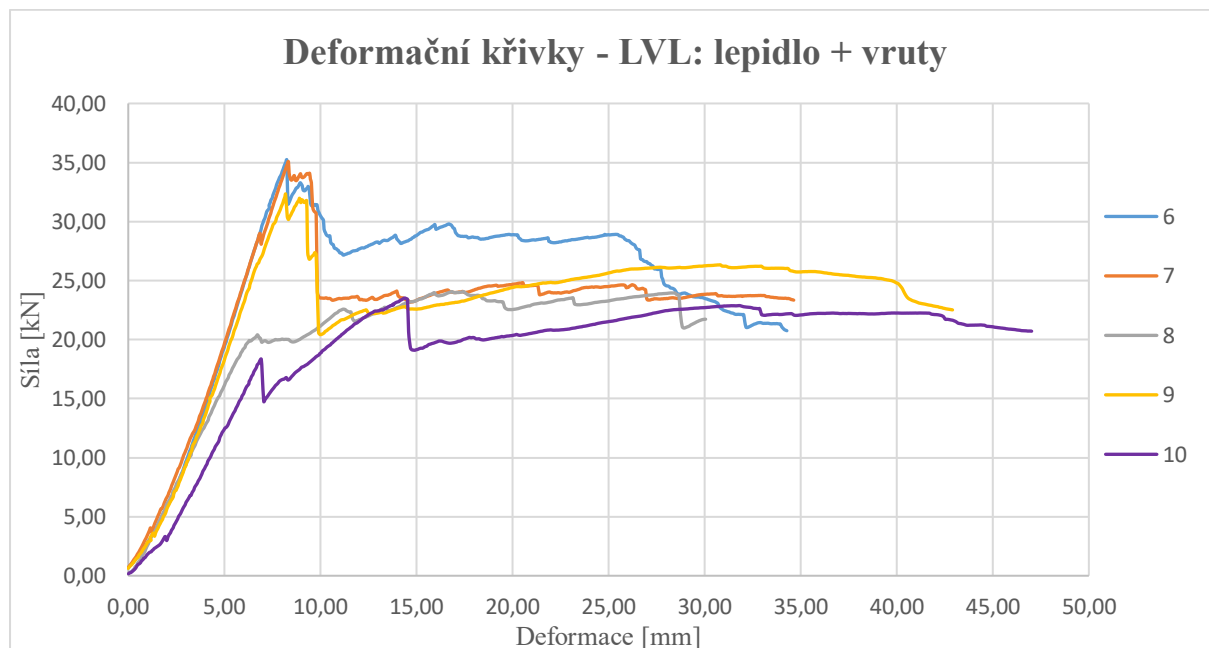
Obr. 46 - 3D model s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva s vruty

Spoj byl tvořen základním trámem z rostlého dřeva a dvěma bočními příložkami z vrstveného LVL dřeva (obr. 47) o rozměrech 150 x 340 mm a tloušťce 39 mm, tvořené 13-ti vrstvami dýh. Na spoj bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo a vruty HBS Ø8/80.



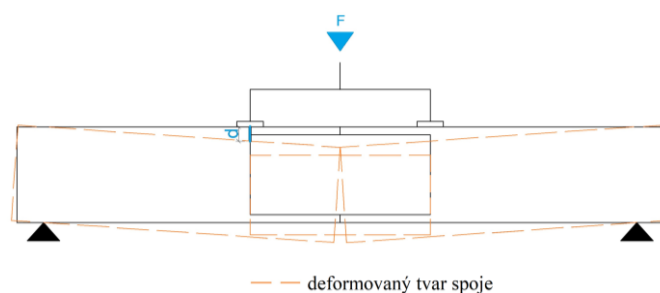
Obr. 47 - Zatěžování spoje

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf č.5 zobrazující deformační křivky, které znázorňují závislost síly na deformaci.



Graf č.5 - Deformační křivky - LVL: lepidlo + vruty

Průměrná hodnota svislé síly na mezi únosnosti spojů s přilepenou i s vruty spojenou příložkou z vrstveného LVL dřeva je 30,04 kN a průměrná hodnota deformace z naměřených hodnot je 37,78 mm.



Obr. 48 - Schéma deformace spoje

Tab. 8 - Naměřené síly a deformace

Vzorek	Max. síla F [kN]	Max. deformace d [mm]
6	35,25	34,28
7	35,06	34,64
8	24,07	30,05
9	32,31	42,90
10	23,52	47,02
Průměrná hodnota	30,04	37,78

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel sil:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 30,04$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 5,21$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,176$$

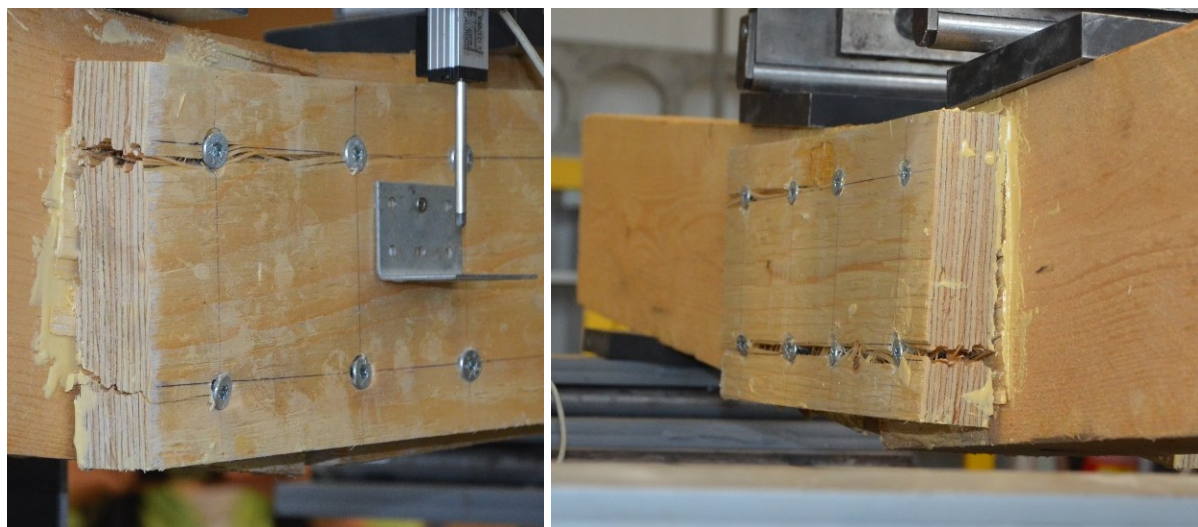
Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel deformací:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 37,78$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 6,22$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,167$$

Z grafu č.5 je patrné, že průběh deformačních křivek tohoto typu spoje je částečně lineární. Při dosažení maximální únosnosti tohoto spoje dochází k náhlému kolapsu spoje křehkým porušením, ale v důsledku použití mechanických spojovacích prostředků – vrutů, je totální kolaps oddálen. Spoj se chová duktilně a jeho únosnost je limitována mechanickým spojem. Po dosažení maximální únosnosti mechanického spoje dochází k rozštípání příložky tahem kolmo na vlákna (křehké chování dřeva).

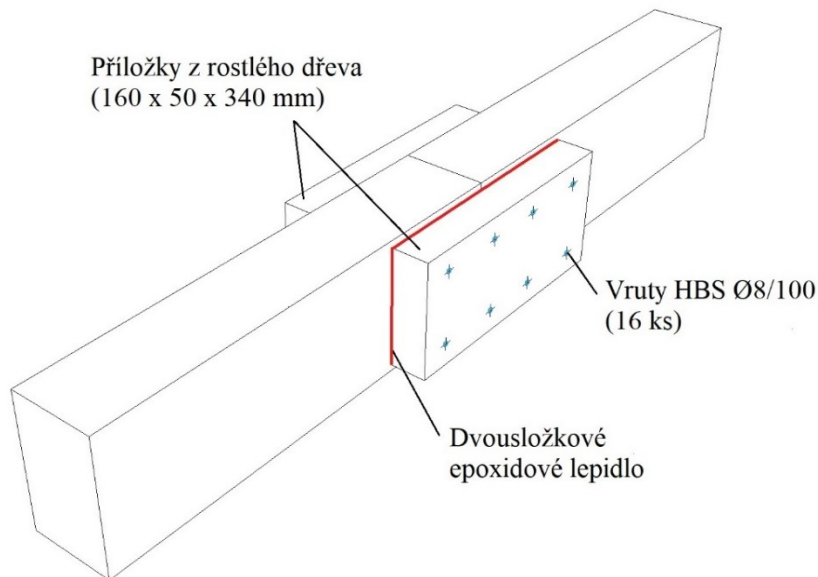


Obr. 49 - Porušení spoje

U těchto příložek z vrstveného LVL dřeva připojených lepidlem a vruty docházelo prvotně k porušení smykem v první či druhé dýze dřeva. Poté došlo k rozštípnutí horní tlačené i spodní tažené části příložky v rovině vrutů (obr. 49).

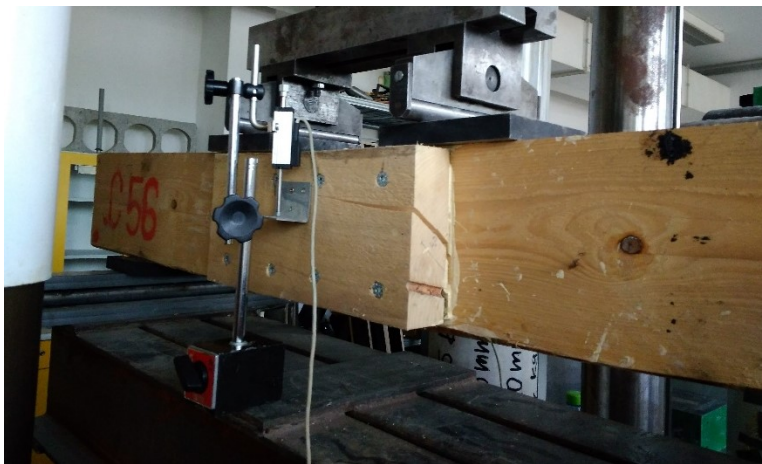
5.1.6 Přilepené příložky z rostlého dřeva i s vruty

Na obr. 50 je zobrazen model spoje s přilepenými příložkami z rostlého dřeva připojené i vruty



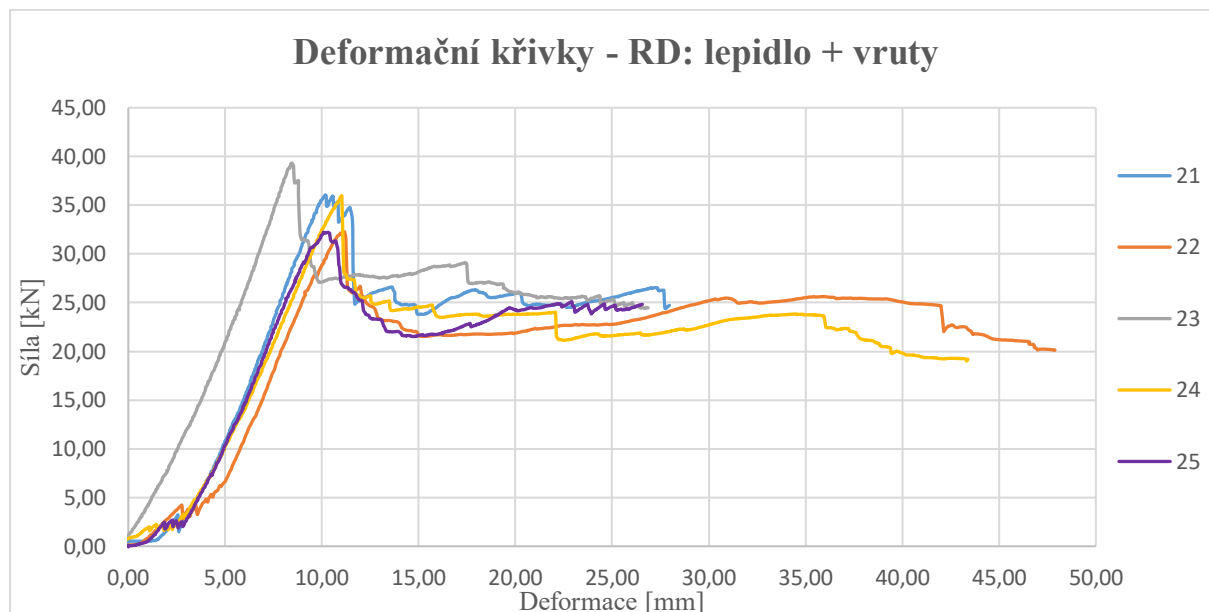
Obr. 50 - 3D model s přilepenými příložkami rostlého dřeva s vruty

Spoj byl tvořen základním trámem z rostlého dřeva a dvěma bočními příložkami z rostlého dřeva (obr. 51) o rozměrech 160 x 340 mm a tloušťce 50 mm. Na spoj bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo a vruty HBS Ø8/100.



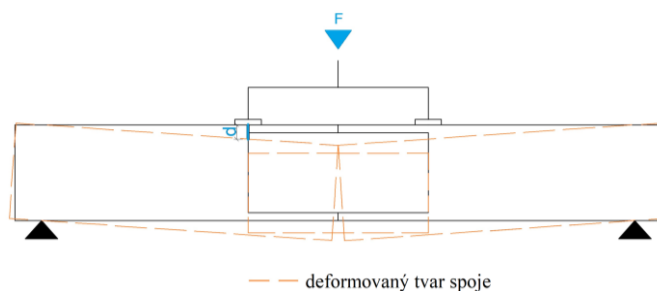
Obr. 51 - Zatěžování spoje

Z naměřených hodnot byl vytvořen graf č.6 zobrazující deformační křivky, které znázorňují závislost síly na deformaci.



Graf č.6 - Deformační křivky - RD: lepidlo + vruty

Průměrná hodnota svislé síly na mezi únosnosti spojů s přilepenou i s vruty připojenou příložkou z rostlého dřeva je 35,16 kN a průměrná hodnota deformace z naměřených hodnot je 34,53 mm.



Obr. 52 - Schéma deformace spoje

Tab. 9 - Naměřené síly a deformace

Vzorek	Max. síla F [kN]	Max. deformace d [mm]
21	36,03	27,96
22	32,26	47,89
23	39,32	26,86
24	35,98	43,39
25	32,23	26,57
Průměrná hodnota	35,16	34,53

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel sil:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 35,16$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 2,67$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,076$$

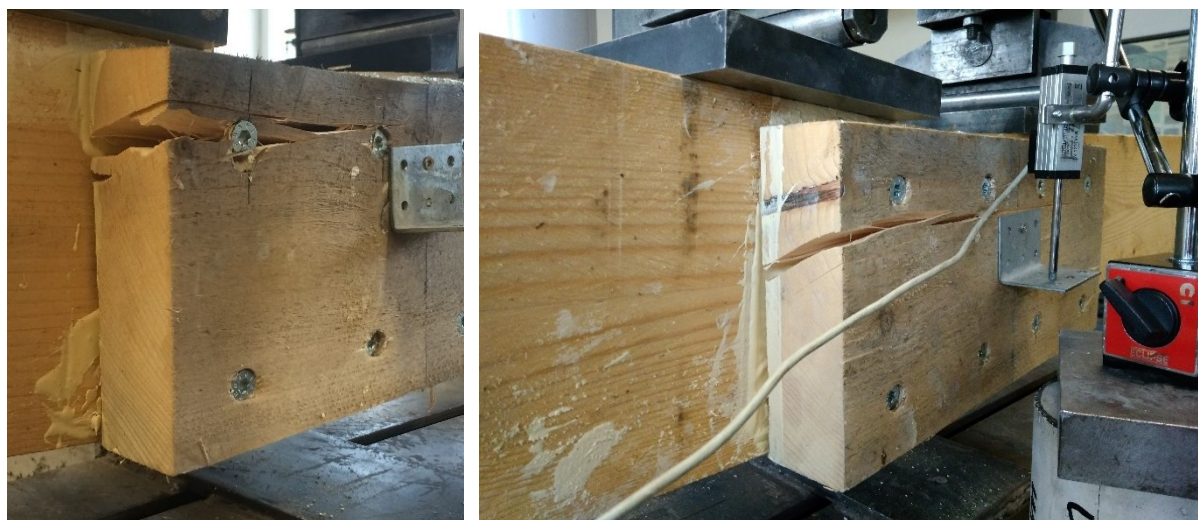
Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel deformací:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 34,53$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 9,19$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,275$$

Z grafu č.6 je patrné, že pracovní průběh tohoto typu spoje je částečně lineární. Při dosažení maximální únosnosti tohoto spoje dochází k náhlému kolapsu spoje křehkým porušením, ale v důsledku použití mechanických spojovacích prostředků – vrutů je totální kolaps oddálen. Spoj se chová duktilně a jeho únosnost je limitována mechanickým spojem. Po dosažení maximální únosnosti mechanického spoje dochází k rozštípaní příložky (křehké chování dřeva).



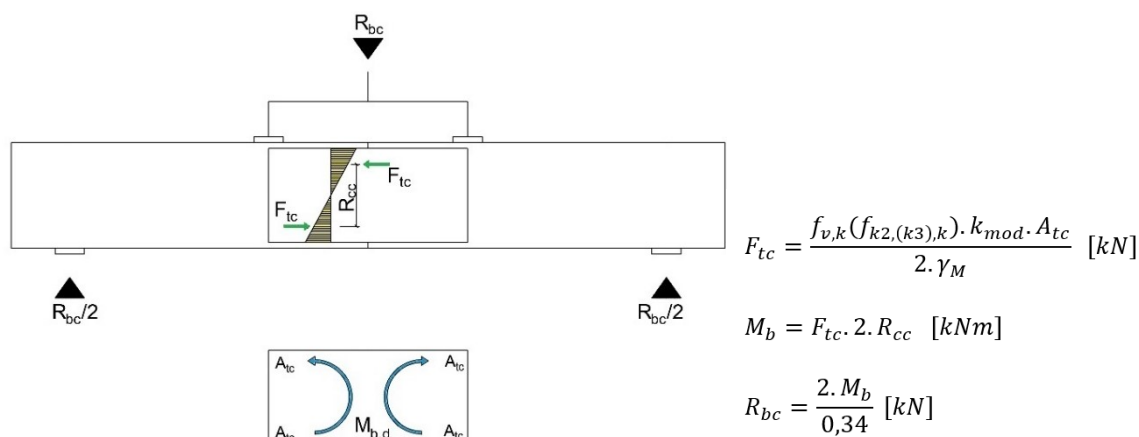
Obr. 53 - Porušení spoje

U těchto příložek z rostlého dřeva připojených lepidlem a vruty docházelo k rozštípnutí horní tlačené části příložky v rovině vrutů, ale i k tomu, že příložky praskly od středového prvku (trámu) směrem ven a vždy směrem nahoru po letokruzích nebo kolmo na letokruhy stejně jako u pouze přilepených příložek z rostlého dřeva (obr. 53).

5.2 Výsledky výpočtů

5.2.1 Přilepené příložky

Na obr. 54 je zobrazeno rozložení napětí a sil ve spoji.



Obr. 54 - Rozložení napětí a sil v lepeném spoji

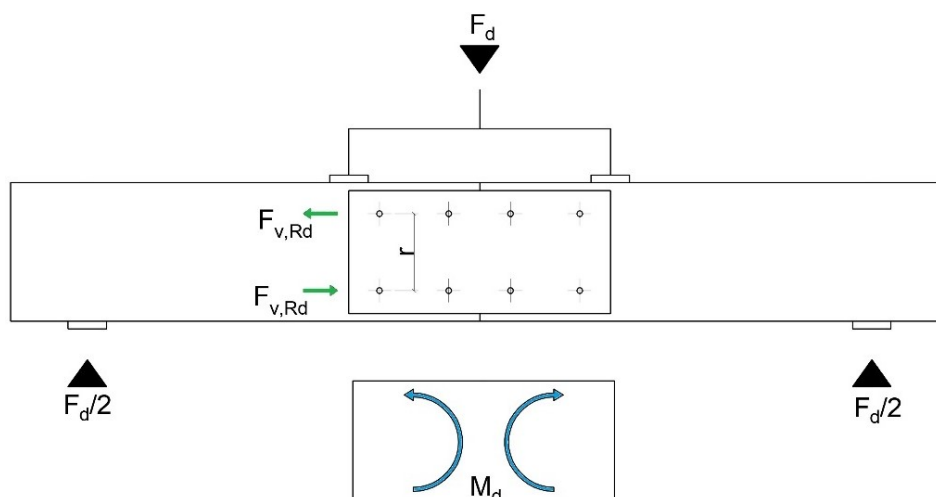
Tab. 10 - Výpočet lepeného spoje s příložkami z vrstveného i rostlého dřeva

Vstupní parametry					
Příložky z vrstveného dřeva			Příložky z rostlého dřeva		
h	0,15	m	h	0,16	m
b	0,34	m	b	0,34	m
$f_{v,k}$	4,6	MPa	$f_{v,k}$	4	MPa
$f_{k2,k}$	0,75	MPa	$f_{k2,k}$	0,75	MPa
$f_{k3,k}$	1,50	MPa	$f_{k3,k}$	1,50	MPa
A_{tc}	0,0128	m ²	A_{tc}	0,014	m ²
R_{cc}	0,1	m	R_{cc}	0,107	m
k_{mod}	0,9	-	k_{mod}	0,9	-
γ_M	1,3	-	γ_M	1,3	-
Únosnost příložky ve smyku					
F_{tc1}	20,30	kN	F_{tc1}	18,83	kN
M_{bd1}	4,06	kNm	M_{bd1}	4,02	kNm
R_{bc1}	23,88	kN	R_{bc1}	23,63	kN
Únosnost lepené spáry (při nerovnoměrném rozdělení smykového napětí)					
F_{tc2}	3,31	kN	F_{tc2}	3,53	kN
M_{bd2}	0,66	kNm	M_{bd2}	0,75	kNm
R_{bc2}	3,89	kN	R_{bc2}	4,43	kN

Únosnost lepené spáry (při rovnoměrném rozdělení smykového napětí)					
F_{tc3}	6,62	kN	F_{tc3}	7,06	kN
M_{bd3}	1,32	kNm	M_{bd3}	1,51	kNm
R_{bc3}	7,79	kN	R_{bc3}	8,86	kN

5.2.2 Příložky připojené vruty

Na obr. 55 je zobrazeno rozložení sil ve spoji.

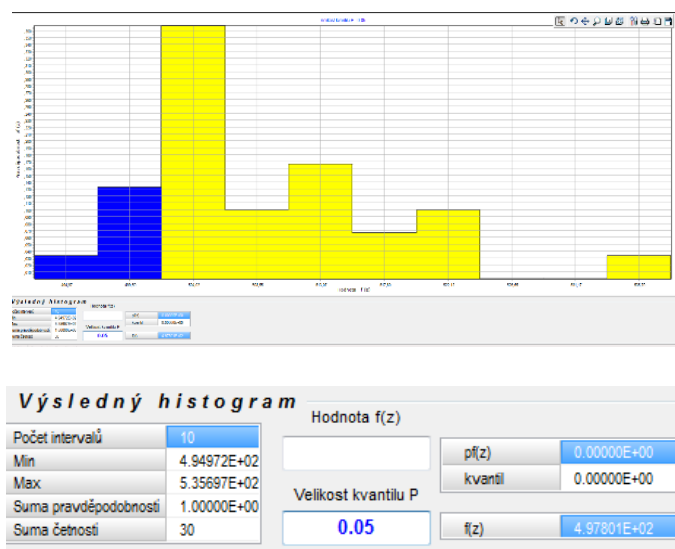


Obr. 55 - Rozložení sil ve spoji s vruty

- Příložky z vrstveného dřeva:**

Výpočet maximálního zatížení na sestavu pro příložky z rostlého dřeva. Výpočet je stanoven pro příložky i trámy s hustotou z normy [1], ale také s hustotou z naměřených hodnot, která byla stanovena jako 5% kvantil z naměřených hodnot v programu Histan.

Stanovení 5% kvantilu hustoty z naměřených hodnot pro příložky (obr. 56).



Obr. 56 – Histogram hustoty příložek z vrstveného dřeva

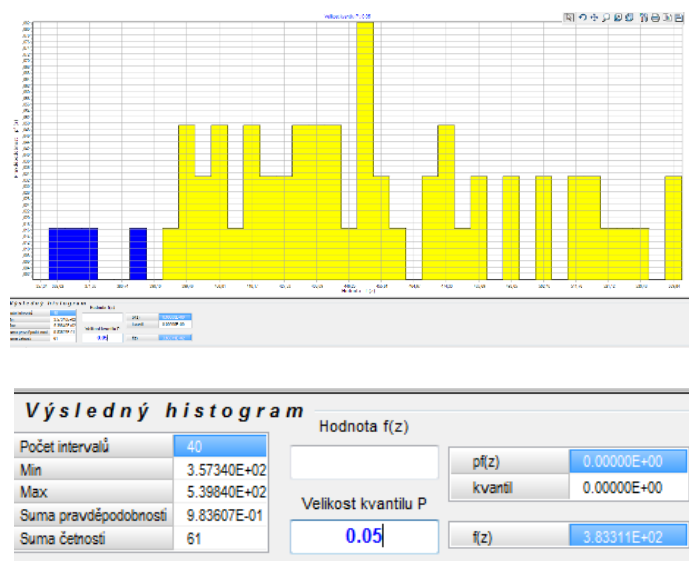
Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 508$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 9,71$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,0191$$

Stanovení 5% kvantilu hustoty z naměřených hodnot pro trámy (obr. 57).



Obr. 57 - Histogram hustoty trámů

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 447,8$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 44,71$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,0998$$

$\rho_1 = 498 \text{ kg/m}^3$ hustota přílozek

$\rho_2 = 383 \text{ kg/m}^3$ hustota trámů

Tab. 11 - Výpočet spoje s vruty a příložkami z vrstveného dřeva

Vstupní parametry					
Příložky z vrstveného dřeva					
Výpočet s hustotou z normy			Výpočet s hustotou z naměřených hodnot		
d	8	mm	d	8	mm
l	80	mm	l	80	mm
t ₁	39	mm	t ₁	39	mm
t ₂	41	mm	t ₂	41	mm
ρ_{k1}	480	kg/m ³	ρ_{k1}	498	kg/m ³
ρ_{k2}	350	kg/m ³	ρ_{k2}	383	kg/m ³
k _{mod}	0,9	-	k _{mod}	0,9	-
γ_M	1,3	-	γ_M	1,3	-
r	0,09	m	r	0,09	m

$$f_{h,k,1} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_{k,1} \text{ [MPa]}$$

$$f_{h,k,2} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_{k,2} \text{ [MPa]}$$

$$\beta = \frac{f_{h,k,2}}{f_{h,k,1}} \text{ [-]}$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} \text{ [Nmm]}$$

$$f_{ax,k} = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_k^{1,5} \text{ [MPa]}$$

$$F_{ax,Rk} = (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} \cdot f_{ax,k} \text{ [-]}$$

$F_{v,Rk}$ – Johansenovy vzorce

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \text{ [kN]}$$

$$M_d = 2 \cdot 2 \cdot F_{v,Rd} \cdot r \text{ [kNm]}$$

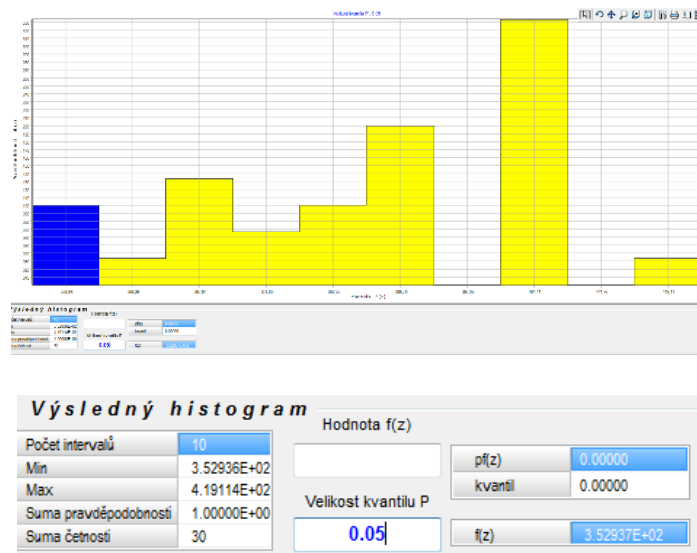
$$F_d = \frac{2 \cdot M_d}{0,34} \text{ [kN]}$$

Stanovení únosnosti spoje s vruty					
$f_{h,k1}$	36,21	MPa	$f_{h,k1}$	37,55	MPa
$f_{h,k2}$	26,40	MPa	$f_{h,k2}$	28,92	MPa
β	0,729167	-	β	0,77	-
f_u	1000	MPa	f_u	1000	MPa
$M_{y,Rk}$	66858,28	Nmm	$M_{y,Rk}$	66858,28	Nmm
$f_{ax,k}$	23,57	MPa	$f_{ax,k}$	27,02	MPa
$F_{ax,Rk}$	5098	-	$F_{ax,Rk}$	5842,70	-
$F_{v,Rk}$	5,38	kN	$F_{v,Rk}$	5,83	kN
$F_{v,Rd}$	3,73	kN	$F_{v,Rd}$	4,04	kN
M_d	1,34	kNm	M_d	1,45	kNm
F_d	7,89	kN	F_d	8,55	kN

- **Příložky z rostlého dřeva:**

Výpočet maximálního zatížení na sestavu pro příložky z rostlého dřeva. Výpočet je stanoven pro příložky i trámy s hustotou z normy [1]w, ale také s hustotou z naměřených hodnot, která byla stanovena jako 5% kvantil z naměřených hodnot v programu Histan.

Stanovení 5% kvantilu hustoty z naměřených hodnot pro příložky (obr. 58).



Obr. 58 - Histogram hustot příložek z rostlého dřeva

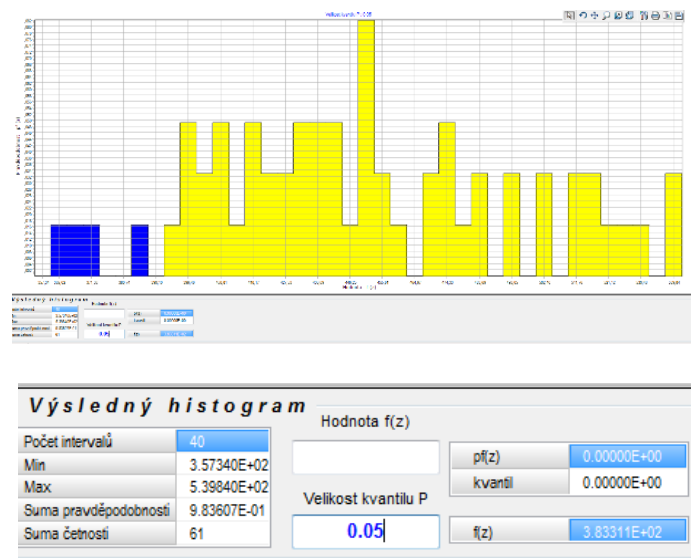
Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 384,3$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 19,55$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,05$$

Stanovení 5% kvantilu hustoty z naměřených hodnot pro trámy (obr. 59).



Obr. 59 - Histogram hustoty trámů

Aritmetický průměr, směrodatná odchylka, variační součinitel:

$$m_x = \frac{\sum x_i}{n} = 447,8$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m_x)^2}{n-1}} = 44,71$$

$$v_x = \frac{s_x}{m_x} = 0,0998$$

$\rho_1 = 353 \text{ kg/m}^3$ hustota přílozek

$\rho_2 = 383 \text{ kg/m}^3$ hustota trámů

Tab. 12 - Výpočet spoje s vruty a příložkami z rostlého dřeva

Vstupní parametry					
Příložky z rostlého dřeva					
Výpočet s hustotou z normy			Výpočet s hustotou z naměřených hodnot		
d	8	mm	d	8	mm
l	100	mm	l	100	mm
t ₁	50	mm	t ₁	50	mm
t ₂	50	mm	t ₂	50	mm
ρ _{k1}	350	kg/m ³	ρ _{k1}	353	kg/m ³
ρ _{k2}	350	kg/m ³	ρ _{k2}	383	kg/m ³
k _{mod}	0,9	-	k _{mod}	0,9	-
γ _M	1,3	-	γ _M	1,3	-
r	0,1	m	r	0,1	m

$$f_{h,k,1} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_{k,1} \text{ [MPa]}$$

$$f_{h,k,2} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_{k,2} \text{ [MPa]}$$

$$\beta = \frac{f_{h,k,2}}{f_{h,k,1}} [-]$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{t,k} \cdot d^{2,6} \text{ [Nmm]}$$

$$f_{ax,k} = 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_k^{1,5} \text{ [MPa]}$$

$$F_{ax,Rk} = (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{0,8} \cdot f_{ax,k} [-]$$

$F_{v,Rk}$ – Johansenovy vzorce

$$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk} \cdot k_{mod}}{\gamma_M} \text{ [kN]}$$

$$M_d = 2 \cdot 2 \cdot F_{v,Rd} \cdot r \text{ [kNm]}$$

$$F_d = \frac{2 \cdot M_d}{0,34} \text{ [kN]}$$

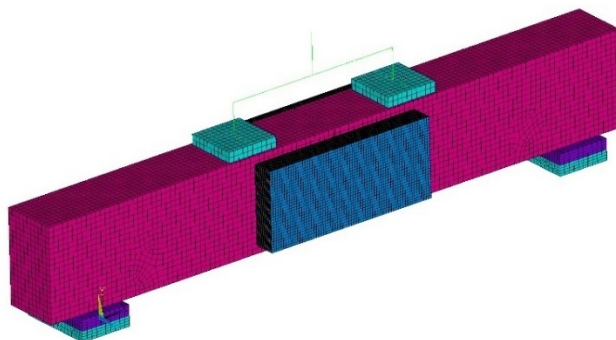
Stanovení únosnosti spoje s vruty					
f _{h,k1}	26,40	MPa	f _{h,k1}	26,62	MPa
f _{h,k2}	26,40	MPa	f _{h,k2}	28,92	MPa
β	1	-	β	1,09	-
f _u	1000	MPa	f _u	1000	MPa
M _{y,Rk}	66858,28	Nmm	M _{y,Rk}	66858,28	Nmm
f _{ax,k}	23,57	MPa	f _{ax,k}	27,02	MPa
F _{ax,Rk}	6183	-	F _{ax,Rk}	7086	-
F _{v,Rk}	5,92	kN	F _{v,Rk}	6,37	kN
F _{v,Rd}	4,10	kN	F _{v,Rd}	4,41	kN
M _d	1,64	kNm	M _d	1,76	kNm
F _d	9,64	kN	F _d	10,38	kN

5.3 Výsledky numerického modelování

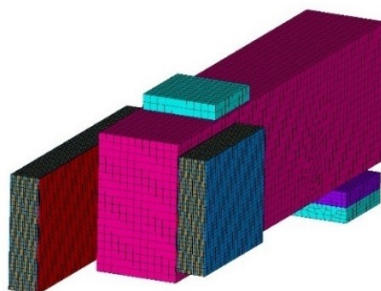
5.3.1 Přilepené příložky

- **Příložky z vrstveného dřeva:**

Na obr. 60 a 61 je model a řez modelem trámu s příložkami z vrstveného LVL dřeva vytvořený v programu ANSYS.

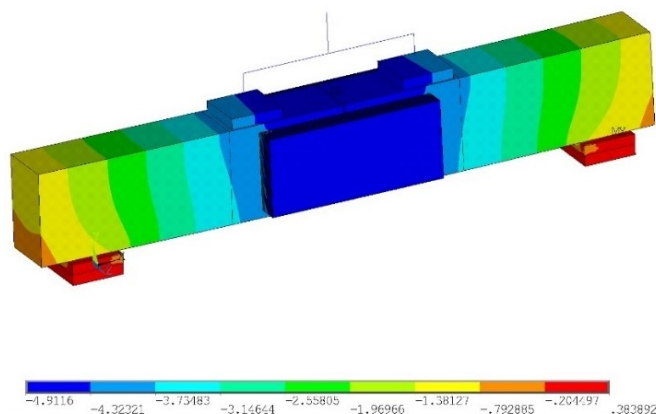


Obr. 60 - 3D model v programu ANSYS



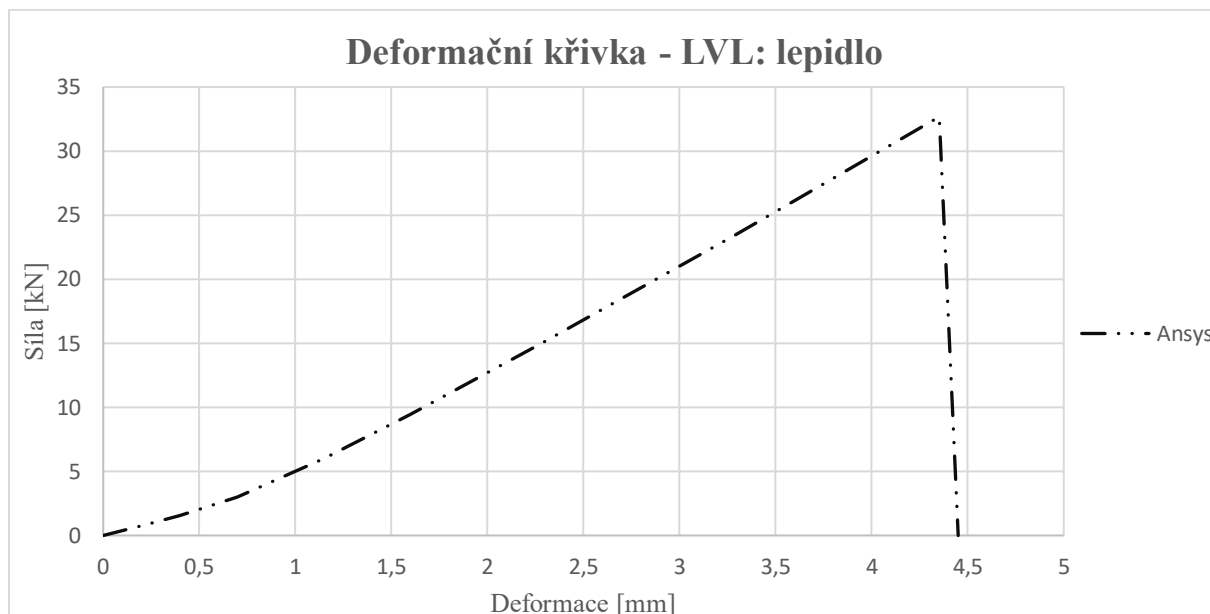
Obr. 61 - Řez modelem

Na obr. 62 je vyobrazena maximální deformace spoje ve směru osy y, která vyšla dle numerického modelu 4,912 mm a deformace pod simulovanou hlavou lisu 4,45.



Obr. 62 - Deformace v ose y

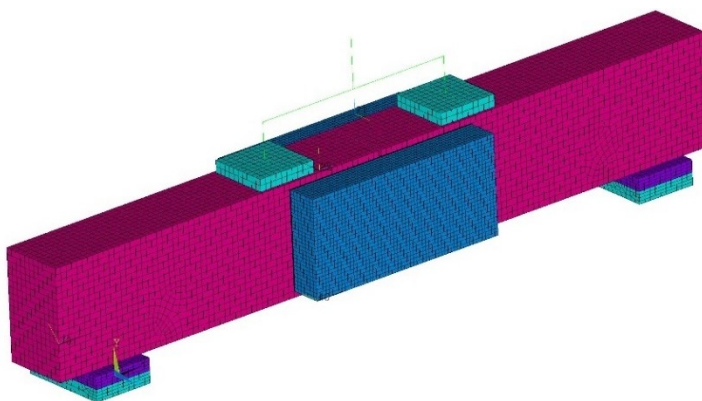
V grafu č.7 je zakreslena deformační křivka, která je vytvořena z výsledných hodnot z programu ANSYS. Maximální síla na sestavu vyšla 32,68 kN a deformace 4,45 mm.



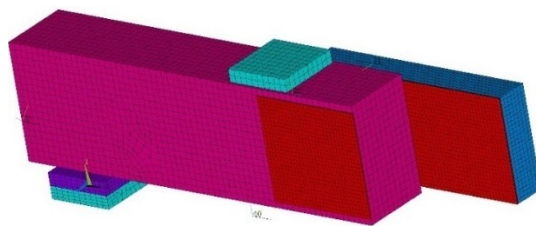
Graf č.7 - Deformační křivky - LVL:lepidlo

- **Příložky z rostlého dřeva:**

Na obrázku 63 a 64 je model a řez modelem trámu s příložkami z vrstveného LVL dřeva vytvořený v programu ANSYS.

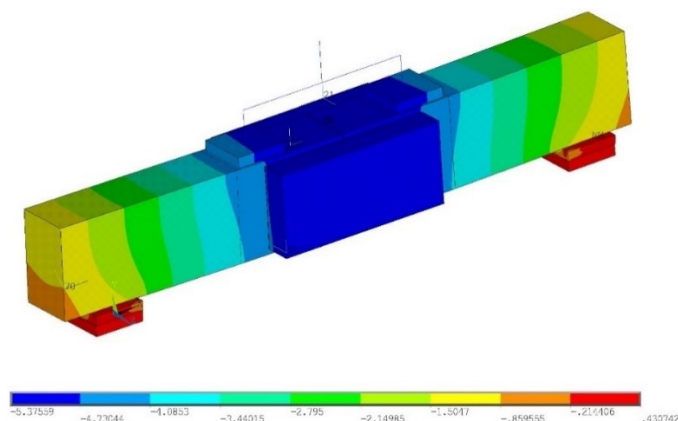


Obr. 63 - 3D model spoje v programu ANSYS



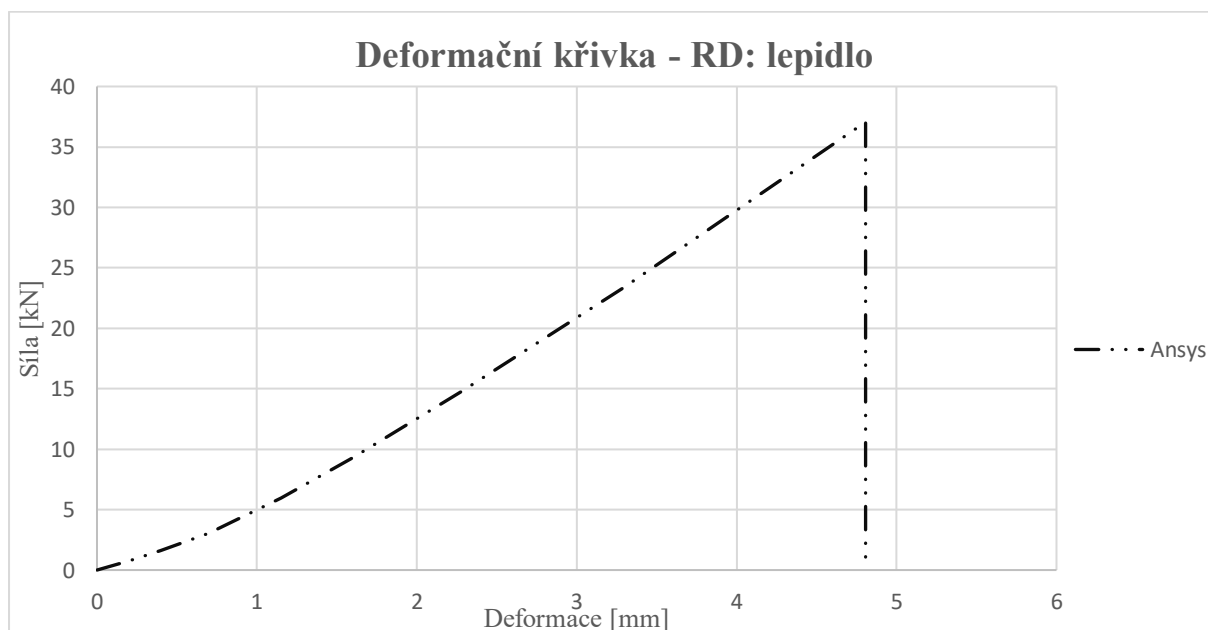
Obr. 64 - Řez modelem

Na obr. 65 je vyobrazena maximální deformace spoje ve směru osy y, která vyšla dle numerického modelu 5,376 mm a deformace pod simulovanou hlavou lisu 4,81.



Obr. 65 - Deformace spoje v ose y

V grafu č.8 je zakreslena deformační křivka, která je vytvořena z výsledných hodnot z programu ANSYS. Maximální síla na sestavu vyšla 37,06 kN a deformace 4,81 mm.

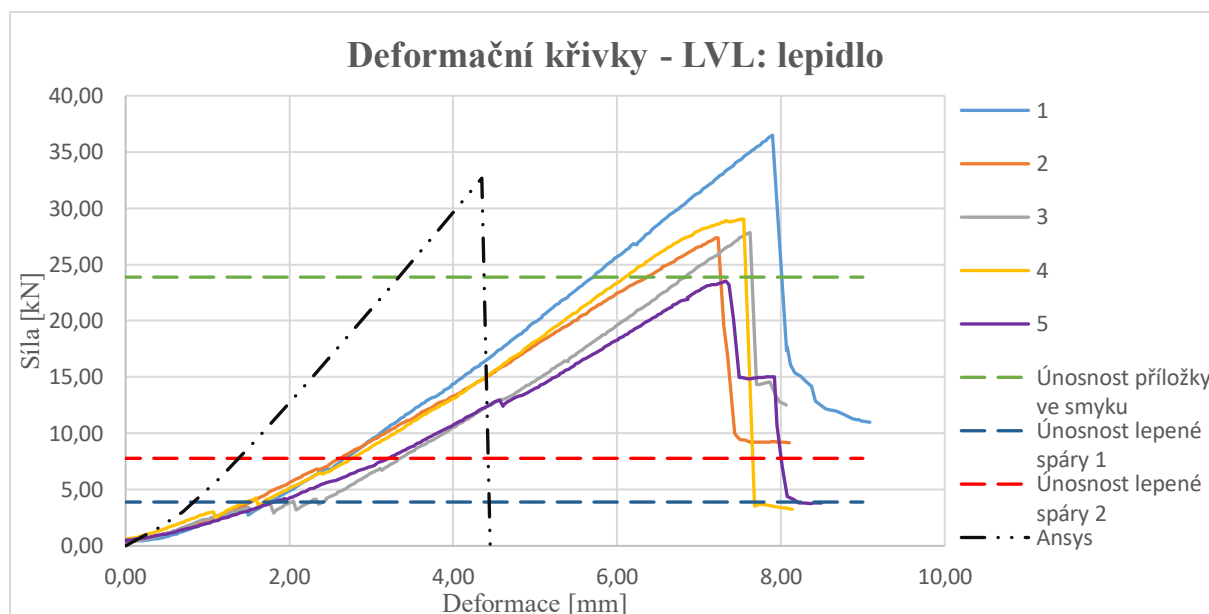


Graf č.8 - Deformační křivky - RD: lepidlo

5.4 Srovnání

5.4.1 Přilepené příložky

- Příložky z vrstveného dřeva:



Graf č.9 - Deformační křivky - LVL: lepidlo

V grafu č.9 jsou zakresleny deformační křivky vzorků z laboratorního testování, deformační křivka vytvořena z výsledků numerického modelu. Čárkovanou čarou jsou přímky, které znázorňují jednotlivé únosnosti z výpočtu dle platných norem [1], [2]. Vypočtená návrhová únosnost příložky ve smyku 23,88 kN je zobrazena zelenou barvou. Návrhové únosnosti v lepené spáře jsou 3,89 kN a 7,79 kN, kdy modrá je při nerovnoměrném rozdělení smykového napětí (což je při nerovnoměrném nanesení lepidla) a červená při rovnoměrném rozdělení smykového napětí.

Tab. 13 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem

Výpočet dle norem [kN]		
max. zatížení na spoj (smyk příložky)	max. zatížení na spoj (lepená spára)	max. zatížení na spoj (lepená spára)
23,88	3,89	7,788

Pozn.: Smyk příložky - únosnost příložky ve smyku

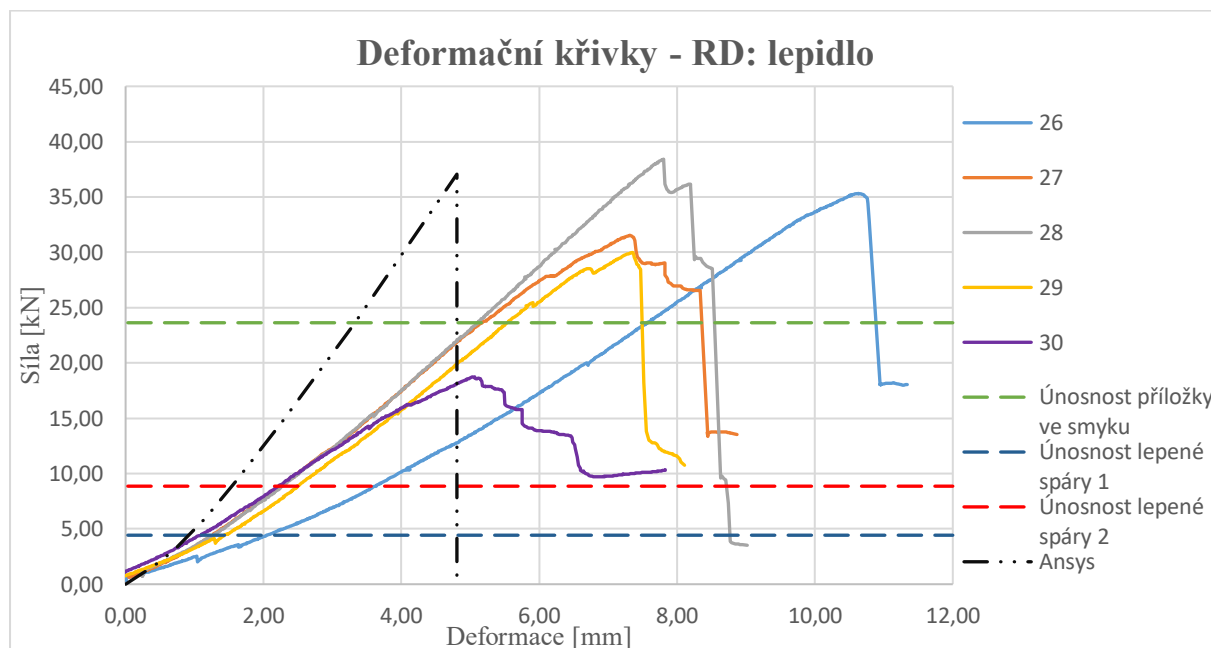
Lepená spára 1- při nerovnoměrném rozdělení smykového napětí

Lepená spára 2- při rovnoměrném rozdělení smykového napětí

Tab. 14 - Výsledné hodnoty z laboratorního testování a numerického modelu

Lab. testování [kN]	Numerický model [kN]
Průměrná hodnota max. naměřených sil	Maximální zatížení na spoj
28,86	32,68

- Příložky z rostlého dřeva:



Graf č.10 - Deformační křivky - RD: lepidlo

V grafu č.10 jsou zakresleny deformační křivky vzorků z laboratorního testování, deformační křivka vytvořena z výsledků numerického modelu. Čárkovanou čarou jsou přímky, které znázorňují jednotlivé únosnosti z výpočtu dle platných norem [1], [2]. Návrhová únosnost příložky ve smyku, která je 23,63 kN a je zobrazena zelenou barvou. Návrhové únosnosti v lepené spáře jsou 4,43 kN a 8,86 kN, kdy modrá je při nerovnoměrném rozdělení smykového napětí (což je při nerovnoměrném nanesení lepidla) a červená při rovnoměrném rozdělení smykového napětí.

Tab. 15 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem

Výpočet dle norem [kN]		
max. zatížení na spoj (smyk příložky)	max. zatížení na spoj (lepená spára1)	max. zatížení na spoj (lepená spára2)
23,63	4,43	8,86

Pozn.: Smyk příložky - únosnost příložky ve smyku

Lepená spára 1- při nerovnoměrném rozdělení smykového napětí

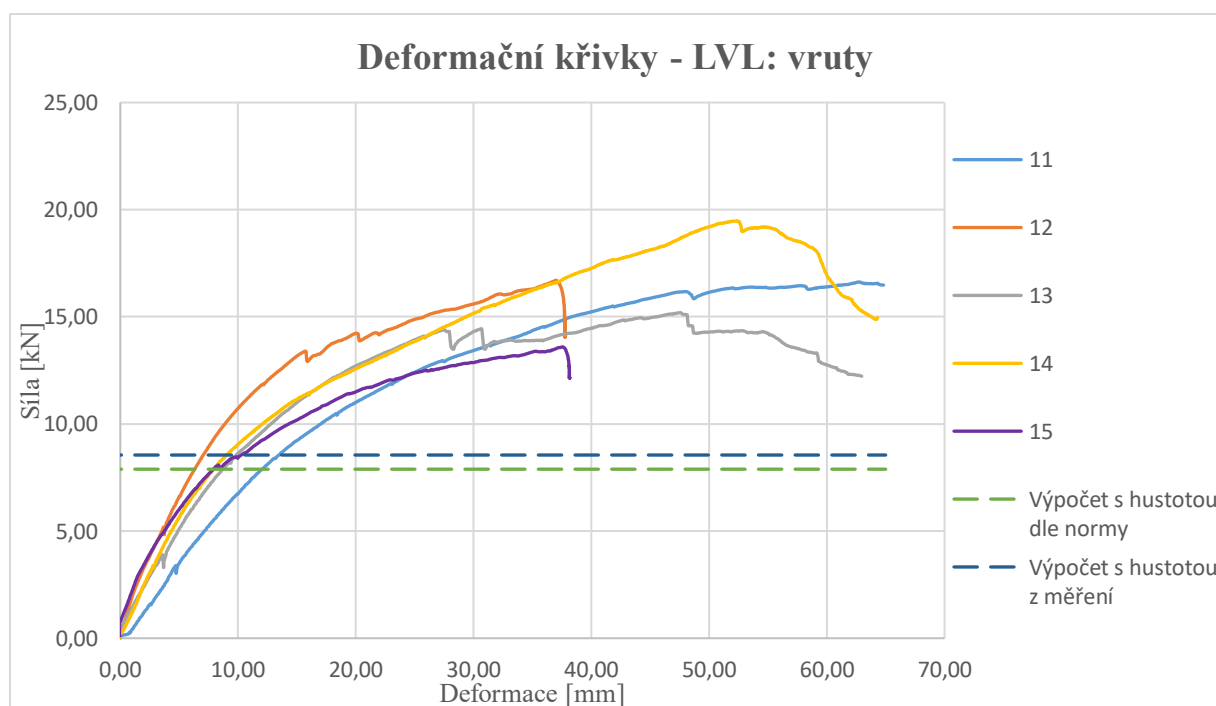
Lepená spára 2- při rovnoměrném rozdělení smykového napětí

Tab. 16 - Výsledné hodnoty z laboratorního testování a numerického modelu

Lab. testování [kN]	Numerický model [kN]
Průměrná hodnota max. naměřených sil	Maximální zatížení na spoj
30,80	37,06

5.4.2 Příložky připojené vruty

- Příložky z vrstveného dřeva:



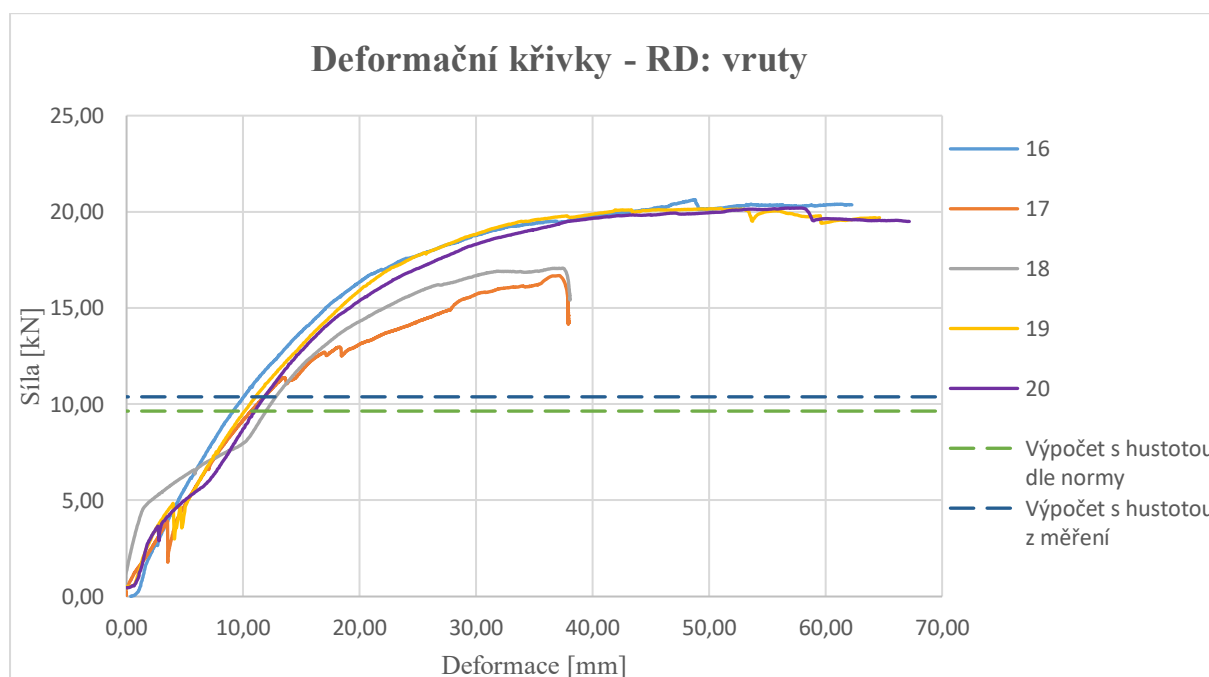
Graf č.11 - Deformační křivky - LVL: vruty

V grafu č.11 jsou zakresleny deformační křivky vzorků a čárkovanou čarou přímky, které znázorňují maximální sílu na sestavu z výpočtu dle normy [1]. U spoje s vruty s hustotou dle normy pro trámy z rostlého dřeva 350 kg/m^3 a příložky z vrstveného LVL dřeva o hustotě 480 kg/m^3 je stanovena maximální síla na sestavu $7,89 \text{ kN}$. U spoje s hustotou stanovenou z naměřených hodnot, kde hustota pro trámy z rostlého dřeva je 383 kg/m^3 a pro příložky z vrstveného LVL dřeva 498 kg/m^3 , je stanovena maximální síla na sestavu $8,55 \text{ kN}$.

Tab. 17 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem a laboratorního testování

Výpočet dle norem [kN]		Lab. testování [kN]
max. zatížení na spoj (s hustotou z normy)	max. zatížení na spoj (s hustotou z měření)	Průměrná hodnota max. naměřených sil
7,89	8,55	16,32

- Příložky z rostlého dřeva:**



Graf č.12 - Deformační křivky - RD: vruty

V grafu č.12 jsou zakresleny deformační křivky vzorků a čárkovanou čarou přímky, které znázorňují maximální sílu na sestavu z výpočtu dle normy [1]. U spoje s vruty s hustotou dle normy pro trámy i příložky z rostlého dřeva 350 kg/m^3 je maximální síla na sestavu $9,644 \text{ kN}$. U spoje s hustotou stanovenou z naměřených hodnot, kde hustota pro trámy z rostlého dřeva je 383 kg/m^3 a pro příložky také z rostlého dřeva 353 kg/m^3 , je maximální síla na sestavu $10,38 \text{ kN}$.

Tab. 18 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem a laboratorního testování

Výpočet dle norem [kN]		Lab. testování [kN]
max. zatížení na spoj (s hustotou z normy)	max. zatížení na spoj (s hustotou z měření)	Průměrná hodnota max. naměřených sil
9,644	10,38	18,98

5.4.3 Celkové srovnání

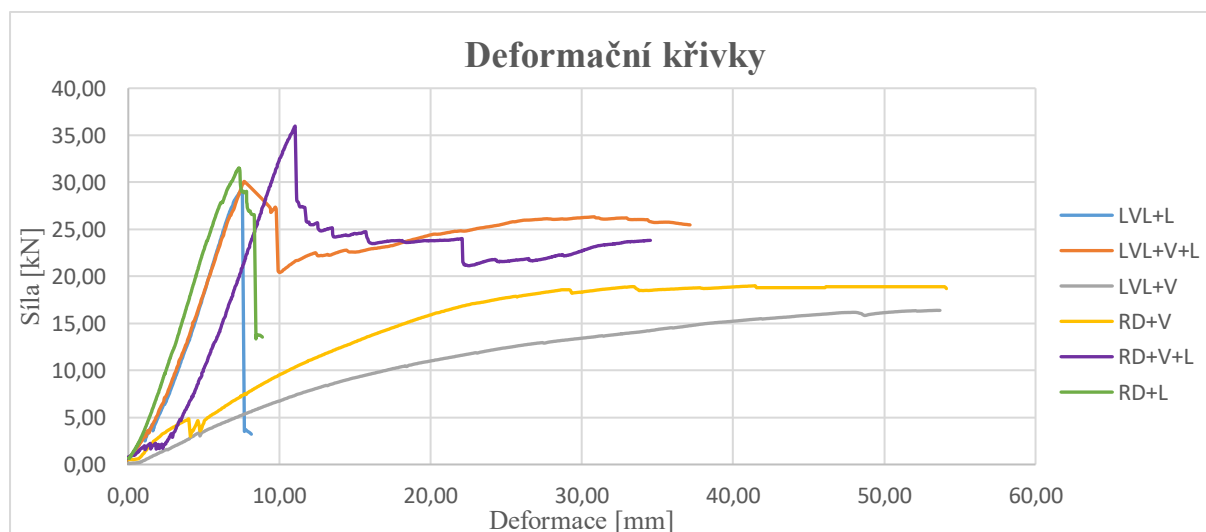
V tab. 19 je porovnání hodnot z laboratorního testování jednotlivých připojení.

Tab. 19 - Výsledky z laboratorního testování

LVL	Průměrná síla [kN]	Průměrná deformace [mm]	RD	Průměrná síla [kN]	Průměrná deformace [mm]
LVL+L	28,86	8,38	RD+L	30,80	9,03
LVL+V+L	30,04	37,78	RD+V+L	35,16	34,53
LVL+V	16,32	53,61	RD+V	18,98	54,12

- LVL+L vrstvené dřevo LVL + lepidlo
- LVL+V+L vrstvené dřevo LVL + vruty + lepidlo
- LVL+V vrstvené dřevo LVL + vruty
- RD+L rostlé dřevo + lepidlo
- RD+V+L rostlé dřevo + vruty + lepidlo
- RD+V rostlé dřevo + vruty

Graf č.13 znázorňuje průměrné deformační křivky jednotlivých typů připojení.



Graf č.13 - Deformační křivky

Z grafu č.13 je patrné, že pouze spoje s lepenými příložkami ať už to jsou příložky z rostlého nebo vrstveného dřeva dosahují přibližně stejné únosnosti. Po dosažení únosnosti spoje došlo v obou případech k okamžitému křehkému porušení. U spojů pouze s vruty má příložka z rostlého dřeva trochu větší únosnost. Deformační odezva spojů s vruty na zatížení byla téměř po celou dobu zatěžování částečně lineární a poté se spoj chová duktilně. U spojů s kombinací lepidla i vrutů má také příložka z rostlého dřeva větší únosnost. U tohoto typu připojení došlo nejprve ke křehkému porušení v důsledku vyčerpání lepeného spoje, ale s použitím mechanických spojovacích prostředků – vrutů je totální kolaps oddálen a spoj se chová duktilně.

V tabulkách 20-24 jsou vypsané hodnoty maximálního zatížení na spoj a deformace z výpočtů dle platných norem, laboratorního testování a numerického modelu.

• Lepené spoje

Tab. 20 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem

Lepené spoje [kN]	Výpočet dle platných norem		
	max. zatížení na spoj (smyk příložky)	max. zatížení na spoj (lepená spára1)	max. zatížení na spoj (lepená spára2)
Příložky LVL	23,88	3,89	7,788
Příložky RD	23,63	4,43	8,86

Pozn.: Smyk příložky - únosnost příložky ve smyku

Lepená spára 1- při nerovnoměrném rozdělení smykového napětí (při nerovnoměrném nanesení lepidla)

Lepená spára 2- při rovnoměrném rozdělení smykového napětí (při rovnoměrném nanesení lepidla)

Tab. 21 - Výsledky laboratorního testování

Lepené spoje [kN]	Laboratorní testování	
	Průměrná hodnota max. naměřených sil	Deformace [mm]
Příložky LVL	28,86	8,38
Příložky RD	30,80	9,03

Tab. 22 - Výsledky z numerického modelu

Lepené spoje [kN]	Numerický model [kN]	
	Maximální zatížení na spoj	Deformace [mm]
Příložky LVL	32,68	4,45
Příložky RD	37,06	4,81

- **Spoje s vruty**

Tab. 23 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle normy

	Výpočet dle platných norem	
Spoje s vruty[kN]	max. zatížení na spoj (s ρ z normy)	max. zatížení na spoj (s ρ z měření)
Příložky LVL	7,89	8,55
Příložky RD	9,644	10,38

Tab. 24 - Výsledky laboratorního testování

	Laboratorní testování	
Spoje s vruty[kN]	Průměrná hodnota max. naměřených sil	Deformace [mm]
Příložky LVL	16,32	53,61
Příložky RD	18,98	54,12

6 Závěr

Cílem diplomové práce bylo provést laboratorní testování s cílem zjistit chování spoje a porovnat s výpočtem dle platných norem a některé spoje také s numerickým modelem.

Z grafu č.1 a grafu č.2 je zřejmé, že deformační odezva pouze lepených spojů na zatížení je téměř po celou dobu zatěžování lineární. Po dosažení únosnosti spoje dochází k okamžitému křehkému porušení.

Z grafu č.3 a grafu č.4 je zřejmé, že deformační odezva spojů s vruty na zatížení je téměř po celou dobu zatěžování částečně lineární a poté se spoj chová duktilně a jeho únosnost je limitována mechanickým spojem. Po dosažení maximální únosnosti mechanického spoje docházelo k rozštípnutí příložky (křehké chování dřeva).

Pro zvýšení únosnosti spojů bylo vhodné lepené spoje doplnit o spojovací prostředky se schopností plastické deformace (vruty). Při dosažení maximální únosnosti tohoto spoje dochází k náhlému kolapsu spoje křehkým porušením, ale v důsledku použití mechanických spojovacích prostředků – vrutů je totální kolaps oddálen (graf č.5 a č. 6). Duktilita je typická pro mechanické spojovací prostředky, zvláště pro spojovací prostředky menších průměrů, které se mohou deformovat ohybem. Tento typ porušení je vhodný pro stavební konstrukce, protože před selháním spoje naznačuje prostřednictvím zvýšených deformací blížící se kolaps spoje. Po dosažení maximální únosnosti mechanického spoje docházelo k rozštípnutí příložky (křehké chování dřeva).

Z grafu č.13 je patrné, že pouze spoje s lepenými příložkami, ať už to jsou příložky z rostlého nebo vrstveného dřeva dosahují přibližně stejné únosnosti. Po dosažení únosnosti spoje došlo v obou případech k okamžitému křehkému porušení. U spojů pouze s vruty má příložka z rostlého dřeva trochu větší únosnost. Deformační odezva spojů s vruty na zatížení byla téměř po celou dobu zatěžování částečně lineární a poté se spoj chová duktilně. U spojů s kombinací lepidla i vrutů má také příložka z rostlého dřeva větší únosnost. U tohoto typu připojení došlo nejprve ke křehkému porušení v důsledku vyčerpání lepeného spoje, ale s použitím mechanických spojovacích prostředků – vrutů je totální kolaps oddálen a spoj se chová duktilně.

Výpočty dle norem jsou velice konzervativní, reálné spoje laboratorně testované vykazovaly daleko vyšší hodnoty únosnosti.

Laboratorní testy byly doplněny numerickými modely, které plně korespondují s geometrií a okrajovými podmínkami zkoušených vzorků. Výsledky získané z těchto numerických modelů jsou v dobré shodě s hodnotami získanými na skutečných vzorcích dřevěných prvků.

Samotný lepený spoj je nejúnosnější, ale chová se křehce. V praktickém použití je limitován křehkým porušením, které je obtížné stanovit, a proto se musí jeho únosnost pro zvýšení bezpečnosti redukovat.

Samotný mechanický spoj vykazuje dobré vlastnosti pro praktický a bezpečný odhad únosnosti. Je ale měkký a méně únosný než lepený spoj.

Podle získaných dat z laboratorního měření jsou nevýhodnější spoje kombinované. To znamená lepený spoj doplněný mechanickými spojovacími prostředky. Tento typ spoje zahrnuje výhodné vlastnosti lepených spojů pro jejich tuhost a pevnost a dobré vlastnosti mechanických spojovacích prostředků pro jejich plastické chování při dosažení únosnosti spoje.

Poděkování

Ráda bych poděkovala mé vedoucí diplomové práce Ing. Kristýně Vavrušové, Ph.D za velkou ochotu, odborné rady a četné konzultace při zpracování diplomové práce. Dále taky Ing. Davidu Mikoláškov, Ph.D, Ing. Bc. Oldřichu Suchardovi, Ph.D a Doc. Ing. Antonínu Lokajovi, Ph.D za odborné rady a výpomoc a Ing. Martinu Šeděnkovi za výpomoc v laboratořích. Poděkování patří také mé rodině a příteli za trpělivost, kterou se mnou měli během tvorby této práce.

Použitá literatura

Seznam použitých norem

- [1] **ČSN EN 1995-1-1 Eurokód 5:** *Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.* Praha Český normalizační institut, 2006
- [2] **ČSN 73 1702** *Navrhování, výpočet a posuzování dřevěných stavebních konstrukcí - Obecná pravidla pro pozemní stavby. (mod DIN 1052:2004).* Praha Český normalizační institut, 2007
- [3] **ČSN EN 1990: Eurokód:** *Zásady navrhování konstrukcí.* Praha Český normalizační institut, 2003
- [4] **ČSN EN 301:** *Fenolická a aminová lepidla pro nosné dřevěné konstrukce - Klasifikace a technické požadavky.* Praha Český normalizační institut, 1995
- [5] **ČSN EN 302-1:** *Lepidla pro nosné a dřevěné konstrukce - Zkušební metody - Část 1: Stanovení podélné pevnosti ve smyku při tahovém namáhání.* Praha Český normalizační institut, 1995
- [6] **ČSN EN 14358:** *Dřevěné konstrukce - Výpočet 5% kvantilů charakteristických hodnot a kritéria přijatelnosti pro výběr.* Praha Český normalizační institut, 2007
- [7] **Eurokód 5:** *Dřevěné konstrukce podle eurokódu 5 - Step 1- Navrhování a konstrukční materiály.* Bohumil Koželouh ,2004.
- [8] **ČSN 73 2824-1** *Třídění dřeva podle pevnosti - Část 1: Jehličnaté řezivo, ČNI, 2004.*

Seznam použitých odkazů

- [9] Kompozitní materiály [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
http://www.vizage.cz/files/KOMPOZITNI_MATERIALY_NA_BAZI_DREVA_WWW.pdf
- [10] Dřevostavby [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
<https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/drevostavby/neni-drevo-jako-drevo>
- [11] Steico LVL [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
http://www.mta.cz/site/assets/files/1602/steico_lvl.pdf
- [12] Dřevo jako stavební materiál [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
<http://www.gebasdomy.cz/1-drevo-jako-stavebni-material-3c1be69b514c1c628eb763f62eac8db9/3>
- [13] Dřevo jako stavební materiál [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
<https://lesycr.cz/drevo/proc-stavet-ze-dreva/drevo-jako-stavebni-material/>
- [14] Struktura dřeva [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
<http://www.ped.muni.cz/wtech/elearning/mtd.pdf>
http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/10.pdf
- [15] Lepidla [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
<http://www.lepidla.cz/cs/a/technologie-a-technika-lepeni--zakladni-informace.html>
- [16] Sanace [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
<https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/drevostavby/rekonstrukce-drevenych-prvku-protezovanim-prilozkovanim-a-ukotvenim-do-ocelovych-konzol>
- [17] Sanace [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
http://uvp3d.cz/dum/?page_id=1575
- [18] Stavební hmoty [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni_hmoty_II/SH_II_Khestl_Mec.pdf
- [19] Dřevo [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
<http://mech.fd.cvut.cz/members/malinovsky/materialy/Drevo%20prezentace.pdf>
http://fast10.vsb.cz/odk/prednasdk/ODPK_AL_04.pdf
- [20] Dřevo [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z:
http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/2.pdf

Seznam použité literatury

- [21] KUKLÍK, Petr. *Dřevěné konstrukce*, Fakulta stavební. ČVUT v Praze, 2005
- [22] WITZANY, J., et al. *PDR – Poruchy, degradace a rekonstrukce*, Praha: ČVUT, 2010
- [23] REINPRECHT, Ladislav. *Ochrana dřeva. 1. vyd.* Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008
- [24] GANDELOVÁ, Libuše. *Nauka o dřevě*, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: 2002.
- [25] KHESTL, Filip. *Stavební hmoty II*, VŠB-TUO, 2013

Seznam použitých programů

Microsoft Word 2016

Microsoft Excel 2016

AutoCAD 2015

HistAn

ANSYS

Seznam obrázků

Obr. 1- Makroskopická stavba kmene [18]	- 14 -
Obr. 2 - Základní řezy dřevem: příčný, radiální a tangenciální [20]	- 14 -
Obr. 3 - Prvky kmene na příčném řezu [18]	- 15 -
Obr. 4 - Stavba jehličnatého a listnatého dřeva [20]	- 17 -
Obr. 5 - Způsoby získávání dýh [18]	- 22 -
Obr. 6 - Vrstvené LVL dřevo [11]	- 23 -
Obr. 7 - Základní tesařské spoje [19]	- 24 -
Obr. 8 - Spojovací prostředky kolíkového a povrchového typu [19]	- 24 -
Obr. 9 - Způsoby připojení přílozek [17]	- 28 -
Obr. 10 - Výškové nadstavení [17]	- 28 -
Obr. 11 - Způsoby protézování [16]	- 29 -
Obr. 12 - Příklad ukotvení do ocelové konzoly [16]	- 30 -
Obr. 13 - Plombování [22]	- 30 -
Obr. 14 - Lis EU100	- 31 -
Obr. 15 - Svinovací metr	- 31 -
Obr. 16 – Váha Soehnle CWE 7745	- 32 -
Obr. 17 – Váha Soehnle professional 7755	- 32 -
Obr. 18 - Digitální posuvné měřítko	- 32 -
Obr. 19 - Schéma uspořádání laboratorní zkoušky	- 33 -
Obr. 20 - Vrutě HBS	- 33 -
Obr. 21- Číslování jednotlivých vzorků	- 35 -
Obr. 22 - Měření vzorků	- 35 -
Obr. 23 - Vážení trámů a přílozek	- 35 -
Obr. 24 - Šířky letokruhů na trámech i příložkách z rostlého dřeva	- 35 -
Obr. 25 - Schéma vnitřních sil a napětí v lepeném spoji	- 36 -
Obr. 26 - Schéma vnitřních sil ve spoji s vrutě	- 38 -
Obr. 27 - Rozmístění vrutů u příložky z vrstveného dřeva	- 41 -
Obr. 28 - Rozmístění vrutů u příložky z rostlého dřeva	- 42 -
Obr. 29 - 3D model	- 42 -
Obr. 30 - 3D model spoje s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva	- 43 -
Obr. 31 - Zatěžování spoje	- 43 -
Obr. 32 - Schéma deformace spoje	- 44 -

Obr. 33 - Porušený spoj	- 45 -
Obr. 34 - 3D model spoje s přilepenými příložkami z rostlého dřeva	- 46 -
Obr. 35 - Zatěžování spoje.....	- 46 -
Obr. 36 - Schéma deformace spoje	- 47 -
Obr. 37 - Porušení spoje	- 48 -
Obr. 38 - 3D model s příložkami z vrstveného LVL dřeva s vruty.....	- 49 -
Obr. 39 - Zatěžování spoje.....	- 49 -
Obr. 40 - Schéma deformace spoje	- 50 -
Obr. 41 - Porušení spoje	- 51 -
Obr. 42- 3D model s příložkami z rostlého dřeva s vruty	- 52 -
Obr. 43 - Zatěžování spoje.....	- 52 -
Obr. 44 - Model deformace spoje.....	- 53 -
Obr. 45 - Porušení spoje	- 54 -
Obr. 46 - 3D model s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva s vruty	- 55 -
Obr. 47 - Zatěžování spoje.....	- 55 -
Obr. 48 - Schéma deformace spoje	- 56 -
Obr. 49 - Porušení spoje	- 57 -
Obr. 50 - 3D model s přilepenými příložkami rostlého dřeva s vruty.....	- 58 -
Obr. 51 - Zatěžování spoje.....	- 58 -
Obr. 52 - Schéma deformace spoje	- 59 -
Obr. 53 - Porušení spoje	- 60 -
Obr. 54 - Rozložení napětí a sil v lepeném spoji	- 61 -
Obr. 55 - Rozložení sil ve spoji s vruty	- 62 -
Obr. 56 – Histogram hustoty příložek z vrstveného dřeva	- 63 -
Obr. 57 - Histogram hustoty trámů	- 63 -
Obr. 58 - Histogram hustot příložek z rostlého dřeva	- 65 -
Obr. 59 - Histogram hustoty trámů	- 66 -
Obr. 60 - 3D model v programu ANSYS	- 68 -
Obr. 61 - Řez modelem.....	- 68 -
Obr. 62 - Deformace v ose y.....	- 68 -
Obr. 63 - 3D model spoje v programu ANSYS	- 69 -
Obr. 64 - Řez modelem.....	- 70 -
Obr. 65 - Deformace spoje v ose y.....	- 70 -

Seznam tabulek

Tab. 1 - 3D modely všech typů spojů	34 -
Tab. 2 - Rozmístění vrutů u příložky z vrstveného dřeva.....	40 -
Tab. 3 - Rozmístění vrutů u příložky z rostlého dřeva	41 -
Tab. 4 - Naměřené síly a deformace.....	44 -
Tab. 5 - Naměřené síly a deformace.....	47 -
Tab. 6 - Naměřené síly a deformace.....	50 -
Tab. 7 - Naměřené síly a deformace.....	53 -
Tab. 8 - Naměřené síly a deformace.....	56 -
Tab. 9 - Naměřené síly a deformace.....	59 -
Tab. 10 - Výpočet lepeného spoje s příložkami z vrstveného i rostlého dřeva	61 -
Tab. 11 - Výpočet spoje s vruty a příložkami z vrstveného dřeva	64 -
Tab. 12 - Výpočet spoje s vruty a příložkami z rostlého dřeva	67 -
Tab. 13 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem	71 -
Tab. 14 - Výsledné hodnoty z laboratorního testování a numerického modelu	72 -
Tab. 15 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem	73 -
Tab. 16 - Výsledné hodnoty z laboratorního testování a numerického modelu	73 -
Tab. 17 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem a laboratorního testování	74 -
Tab. 18 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem a laboratorního testování	75 -
Tab. 19 - Výsledky z laboratorního testování.....	75 -
Tab. 20 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle norem	76 -
Tab. 21 - Výsledky laboratorního testování.....	76 -
Tab. 22 - Výsledky z numerického modelu.....	76 -
Tab. 23 - Výsledné hodnoty z výpočtu dle normy	77 -
Tab. 24 - Výsledky laboratorního testování.....	77 -

Seznam grafů

Graf č.1 - Deformační křivky - LVL: lepidlo	- 44 -
Graf č.2 - Deformační křivky - RD: lepidlo	- 47 -
Graf č.3 - Deformační křivky - LVL: vruty	- 50 -
Graf č.4 - Deformační křivky - RD: vruty	- 53 -
Graf č.5 - Deformační křivky - LVL: lepidlo + vruty	- 56 -
Graf č.6 - Deformační křivky - RD: lepidlo + vruty	- 59 -
Graf č.7 - Deformační křivky - LVL:lepidlo	- 69 -
Graf č.8 - Deformační křivky - RD: lepidlo	- 70 -
Graf č.9 - Deformační křivky - LVL: lepidlo	- 71 -
Graf č.10 - Deformační křivky - RD: lepidlo.....	- 72 -
Graf č.11 - Deformační křivky - LVL: vruty	- 73 -
Graf č.12 - Deformační křivky - RD: vruty	- 74 -
Graf č.13 - Deformační křivky.....	- 75 -

Seznam příloh

Příloha A – seznam tabulek

- č.1 – tabulka trámů a příložek z vrstveného LVL dřeva
- č.2 – tabulka trámů a příložek z rostlého dřeva
- č.3 – tabulka trámů - naměřené hodnoty a stanovená hustota
- č.4 – tabulka příložek z vrstveného LVL dřeva - naměřené hodnoty a stanovená hustota
- č.5 – tabulka příložek z rostlého dřeva - naměřené hodnoty a stanovená hustota

Příloha B – fotodokumentace

Příloha C – technický list vrutů

Příloha D – výsledky z programu ANSYS

Příloha E – výkresová dokumentace

- Výkres č.1 – Trám s přilepenými příložkami z rostlého dřeva
- Výkres č.2 – Trám s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva
- Výkres č.3 – Trám s příložkami z rostlého s vruty
- Výkres č.4 – Trám s příložkami z vrstveného LVL dřeva s vruty
- Výkres č.5 – Trám s přilepenými příložkami z rostlého dřeva spojený i vruty
- Výkres č.6 – Trám s přilepenými příložkami z vrstveného LVL dřeva spojený i vruty
- Výkres č.7 – Výkres rozmístění vrutů u příložky z rostlého dřeva
- Výkres č.8 – Výkres rozmístění vrutů u příložky z vrstveného LVL dřeva